Wie funktioniert das?

Die Technik
im Leben von heute

Meyer-Nachschlagewerke
aus dem
Bibliographischen Institut

Meyers Enzyklopädisches Lexikon
in 25 Bänden

Meyers Kontinente und Meere
in 8 Bänden

Meyers Lexikon der Technik
und der exakten Naturwissenschaften
in 3 Bänden

Meyers Handbücher
der großen Wissensgebiete

Meyers Großes Personenlexikon

Meyers Großes Bücherlexikon

Meyers Großes Handlexikon

Meyers Großer Weltatlas

Meyers Universalatlas

Wie funktioniert das?

Meyers Kinder-Sachbücher

Wie funktioniert das?



Die Technik
im Leben von heute

Herausgegeben
von der Fachredaktion Technik des
Bibliographischen Instituts



Bibliographisches Institut Mannheim/Wien/Zürich
Meyers Lexikonverlag

Redaktionelle Leitung dieses Bandes:
Jürgen Dessaules

357 zweifarbige Schautafeln
8 vierfarbige Schautafeln
367 Textseiten
10 Registerseiten

Satz: Zechnersche Buchdruckerei, Speyer und
Klambt-Druck GmbH, Speyer
Druck und Einband: Klambt-Druck GmbH, Speyer
Printed in Germany
ISBN 3-411-00988-8
G

VORWORT

Jeder — Techniker und Nichttechniker — steht in unserer Zeit immer wieder vor der Frage: „Wie funktioniert das?" Deshalb sind die verschiedenen Bände unter diesem Titel in über 12 Sprachen ein Welterfolg. Das Nebeneinander von Bildtafel und Text vermittelt ein rasches und genaues Verständnis eines technischen Vorgangs.

Der Verlag hat in dieser überarbeiteten Neuausgabe das Wichtigste aus allen technischen Bänden zusammengefaßt, um die Leser in das gesamte Gebiet der Technik einzuführen.

BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT AG

INHALT

ARBEIT, LEISTUNG, ENERGIE

Wird ein Körper gegen eine auf ihn wirkende Kraft um ein Wegstück verschoben, so wird *Arbeit* verrichtet. Sie ist (im physikalischen Sinne) definiert als das Produkt aus dem zurückgelegten Wege s und der Kraftkomponente $K_s = K \cdot \cos\alpha$ in der Wegrichtung: $A = K_s \cdot s$, wobei $\cos\alpha$ der Kosinus des Winkels α zwischen Kraft- und Wegrichtung ist. In dieser vereinfachten Formulierung ist vorausgesetzt, daß die Kraft längs des geradlinig angenommenen Weges konstant bleibt (Abb. 1). Hebt man eine Masse von 1 kg um 1 m, so hat man eine Arbeit von 9,80665 Nm (Newtonmeter) = 1 kpm (Kilopondmeter oder Meterkilopond) verrichtet. Bei dieser Hubarbeit handelt es sich um eine Verschiebungsarbeit gegen die Schwerkraft (Abb. 2). Nach der oben gegebenen Definition stimmt der physikalische Begriff der Arbeit nicht voll mit dem überein, der im täglichen Leben oder in der Volkswirtschaft üblich ist. Ein Mensch, der mit waagerecht ausgestrecktem Arm ein schweres Gewicht einige Zeit hält (Abb. 3), wird dies als Anstrengung, als Arbeit empfinden — im physikalischen Sinne wird hierbei jedoch *keine* Arbeit verrichtet.

Als Maßeinheit der Arbeit dient neben dem Newtonmeter und dem Kilopondmeter vor allem die Kilowattstunde (kWh) bzw. die Wattsekunde (Ws), das Joule (J) und das Erg (erg). Für die Umrechnung gilt: 1 kWh = 3,6 · 10^6 Nm = = 367 098 mkp, 1 mkp = 9,80665 J, 1 J = 1 Nm = 1 Ws = 10^7 erg. Aus der ersten Beziehung kann man ersehen, welch gewaltiger Arbeitsvorrat uns durch den elektrischen Strom für wenig Geld ins Haus geliefert wird. Mit 1 kWh könnte man 367 098 kp um einen Meter heben oder 367 Zentner um 20 m (Abb. 4)!

Je kleiner die Zeitspanne ist, in der eine bestimmte Arbeit verrichtet wird, desto größer ist die *Leistung*. Diese ist in der Physik als der Quotient aus der Arbeit A und der dazu verwendeten Zeit t definiert: $L = A/t$. Auch diese Formulierung ist etwas vereinfacht: Es wird vorausgesetzt, daß die Arbeit A während der Zeit t konstant ist. Wird das Gewichtsstück in Abb. 2 in einer Sekunde (1 s) um 1 m gehoben, so beträgt die Leistung 1 Meterkilopond/Sekunde (mkp/s). Die Leistung 75 mkp/s wird in der Technik als eine Pferdestärke (PS) bezeichnet. Weitere Maßeinheiten der Leistung sind das Watt (W) und das Kilowatt (kW): 1 kW = 1000 W = 101,97 mkp/s = 1,36 PS. Wenn ein Mann, der 75 kp wiegt, eine Treppe hinaufeilt, so daß er pro Sekunde 1 m Höhe gewinnt (das entspricht etwa 6 bis 7 Treppenstufen), so leistet er 1 PS (Abb. 5).

Zum Heben des Gewichtsstückes in Abb. 2 wurde eine bestimmte Arbeit aufgewendet, die nun in ihm durch seine erhöhte Lage als *Energie* (Arbeitsvermögen) aufgespeichert ist. Man sagt, der Körper hat bei II eine höhere *potentielle Energie* (Energie der Lage) als bei I. Die potentielle E_{pot}, die ein auf die Höhe h gehobener Körper vom Gewicht G besitzt, ist gleich der Arbeit, die zum Anheben erforderlich war, also $E_{pot} = G \cdot h$.

Kehrt er wieder in die Lage I zurück, so vermag er im Idealfall die gleiche Arbeit zu verrichten, die vorher an ihm geleistet wurde. Dies ist ein Spezialfall des Satzes von der *Erhaltung der Energie*. Das Gewichtsstück in Abb. 2 kann also beispielsweise über eine Rolle ein anderes, gleich schweres Gewichtsstück auf dieselbe Höhe h heben (Abb. 6).

Wird ein Körper der Masse m aus der Ruhelage auf eine bestimmte Geschwindigkeit v gebracht, so wird ebenfalls Arbeit geleistet (gegen das Beharrungsvermögen bzw. die Trägheitskraft). In ihm ist daher auch ein bestimmter Vorrat an Arbeitsfähigkeit gespeichert, den man als *kinetische Energie* E_{kin} (Energie der Bewegung) bezeichnet. Für diese gilt die Beziehung $E_{kin} = \frac{1}{2} mv^2$. Hieraus ist ersichtlich, daß sich z. B. bei Verdopplung der Geschwindigkeit eines Kraftfahrzeuges die „Wucht" bei einem Aufprall vervierfacht.

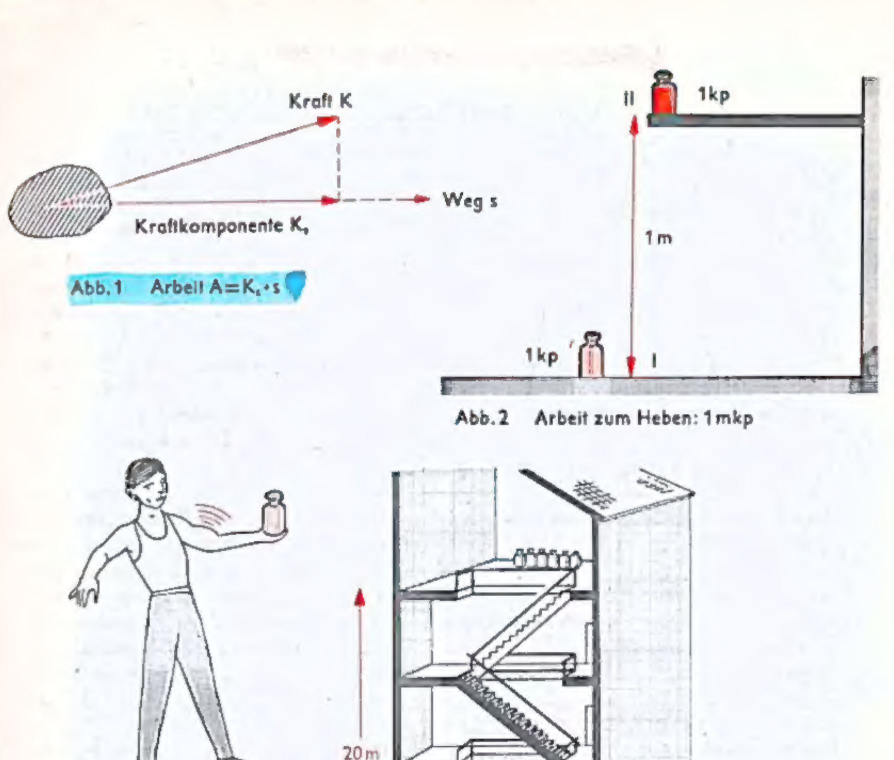


Abb. 1 Arbeit $A = K_s \cdot s$

Abb. 2 Arbeit zum Heben: 1 mkp

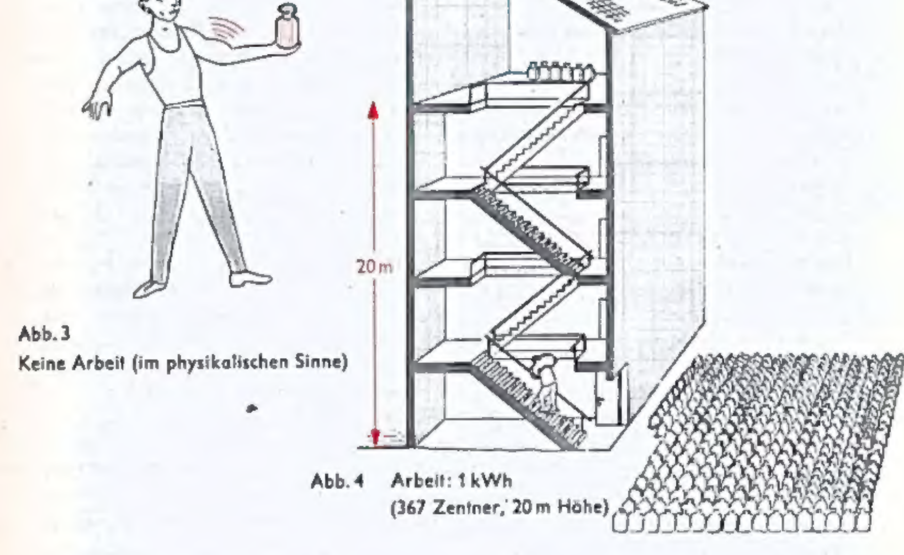


Abb. 3 Keine Arbeit (im physikalischen Sinne)

Abb. 4 Arbeit: 1 kWh (367 Zentner, 20 m Höhe)

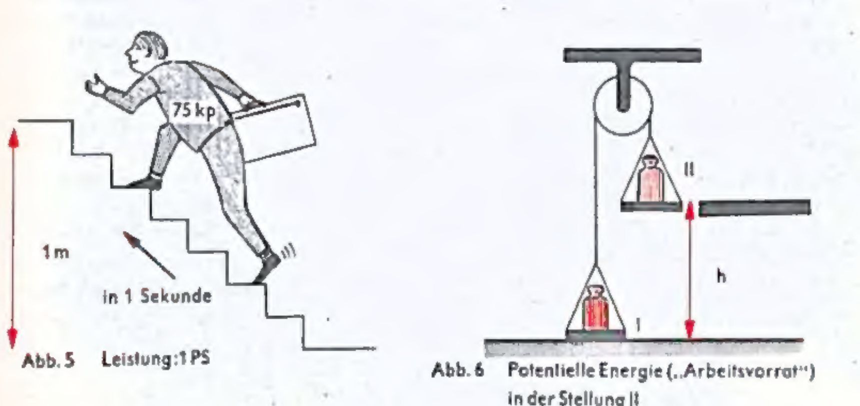


Abb. 5 Leistung: 1 PS

Abb. 6 Potentielle Energie („Arbeitsvorrat") in der Stellung II

ARBEIT, LEISTUNG, ENERGIE II

Neben den mechanischen Energieformen, zu denen die kinetische und die potentielle Energie gehören, gibt es eine Anzahl anderer: Wärmeenergie, elektrische Energie, chemische Energie, Kernenergie usw. Der Betrag der Energie wird auch hier durch die Arbeit angegeben, die mit ihr verrichtet werden kann. Häufig verwendet man bei den verschiedenen Formen auch besondere Maßeinheiten; sie stehen alle in einem festen Umrechnungsverhältnis zu den schon erwähnten Einheiten mkp, erg bzw. J und kWh. Die *Wärmeenergie* wird meistens noch in Kalorien (cal) bzw. Kilokalorien (kcal) angegeben: 1 cal ist die Wärmemenge (Wärmeenergie), die erforderlich ist, um 1 g Wasser bei normalem Atmosphärendruck von 14,5° C auf 15,5° C zu erwärmen. Umrechnung: 1 cal = 4,1855 J = = 0,42680 mkp (Wärmeäquivalent). Die *elektrische Energie* wird in Kilowattstunden (kWh) gemessen. Im atomaren Bereich ist als Energieeinheit das Elektronenvolt (eV) gebräuchlich. 1 eV ist die Energie, die ein Elektron beim freien Durchlaufen einer elektrischen Spannung von 1 Volt (V) gewinnt. Diese Einheit ist im Vergleich zu den bisher erwähnten Einheiten winzig klein: $1\ eV = 4{,}45 \cdot 10^{-26}$ kWh (10^{-26} bedeutet: 1/100 ... insgesamt 26 Nullen). Auch bei der *chemischen Energie* findet man neben der Angabe in Kalorien häufig diese Einheit. Die bei chemischen Reaktionen pro Molekül bzw. Atom umgesetzte Energie liegt in der Größenordnung von einigen Elektronenvolt. Diese Energie ist jedoch nicht gemeint, wenn man von Atomenergie spricht, man meint dann vielmehr die aus Atomkernen bei sog. Kernreaktionen, z. B. bei Kernspaltungen in Kernreaktoren (s. S. 60) freigesetzte Energie, die man treffender als *Kernenergie* bezeichnet. Diese Energie ist weit größer, sie liegt im Bereich von einigen Millionen Elektronenvolt pro Atomkern. Eine Million Elektronenvolt nennt man ein Megaelektronenvolt (MeV); 1 MeV = 1 000 000 eV.

Die verschiedenen Energieformen sind in mannigfacher Weise ineinander umwandelbar, dabei bleibt stets der Betrag der Gesamtenergie erhalten *(Satz von der Erhaltung der Energie,* Robert Mayer, 1842). Strenggenommen gibt es also keine *Energieerzeugung,* man entnimmt die Energie vielmehr einer *Energiequelle* und wandelt sie in eine für Technik und Wirtschaft zweckmäßigere Form um. Beispiele: Die chemische Energie der Kohle verwandelt sich bei der Verbrennung in Wärmeenergie, die man in der Dampfmaschine oder -turbine (s. S. 226, s. S. 228) in mechanische Energie umsetzt. Diese wiederum wird im Elektrizitätswerk im Generator in elektrische Energie umgewandelt. Diese neue Energieform läßt sich nun mit Hilfe elektrischer Leitungen bequem an den jeweiligen Verwendungsort transportieren, wo sie in die benötigten Energieformen umgewandelt werden kann (elektrischer Antrieb, elektrische Heizung, elektrische Beleuchtung usw.; Abb. 7). Bei einem Wasserkraftwerk nutzt man z. B. die potentielle Energie des Wassers in der gegenüber dem Kraftwerk erhöhten Lage des Stausees aus (Abb. 8). Im Rohrleitungssystem erfolgt durch das Herabströmen eine Umwandlung in kinetische Energie, die nun in den Generatoren in elektrische Energie umgesetzt wird. In einem Schiff mit Kernenergieantrieb (Abb. 9) wird in den Brennelementen des Kernreaktors durch Kernspaltung des Kernbrennstoffes (s. S. 56) Wärme erzeugt. Durch den Kernreaktor strömt Kühlwasser, das sich dort erwärmt. Über die Wärmetauscher wird Dampf erzeugt, der seinerseits Turbinenanlagen treibt, in denen die Wärmeenergie des Dampfes in mechanische (Antrieb) und elektrische Energie (elektrischer Eigenbedarf des Schiffes) umgewandelt wird.

Abb. 7 Energieumwandlung

Abb. 8 Wasserkraftwerk

Abb. 9a Kernenergieantrieb

Abb. 9b Antriebsanlage eines Schiffes mit Kernenergieantrieb (Einbauordnung)

REIBUNG I

Unter Reibung versteht man Widerstandskräfte, die zwischen den Berührungsflächen aneinandergrenzender Schichten verschiedener (äußere Reibung) oder der gleichen Stoffe (innere Reibung) als Resultierende makroskopischer oder molekularer Kräfte auftreten und die einer Bewegung der Schichten gegeneinander entgegenwirken (Reibungswiderstand). Die dabei wirksamen makroskopischen Kräfte sind von der Rauhigkeit der Berührungsflächen abhängig, die eine Art Verzahnung der Flächen ineinander bewirken (Abb. 1a). Es muß daher Energie aufgewandt werden, die diese Verzahnung überwindet. Dies kann durch Anhebung der Körper, Wegbiegen oder Abbrechen der Verzahnung geschehen. Letzteres ist beispielsweise die Ursache des Abriebes der Autoreifen; sie läßt die zur Erzielung größerer Haftung vorgesehenen Profile verflachen (Abb. 1b). Will man den Reibungswiderstand hingegen verkleinern, wie z. B. in Gleitlagern von Radachsen, so kann dies durch sorgsame Glättung der Berührungsflächen geschehen. Zurück bleibt dann eine durch molekulare Haftkräfte bedingte Reibung (Abb. 2). Diesen Reibungswiderstand kann man weiter sehr stark herabsetzen, indem man zwischen die Berührungsflächen einen dünnen Flüssigkeitsfilm, insbesondere Ölfilm, bringt (Abb. 3). Auf einem solchen Flüssigkeitsfilm beruht die außerordentlich geringe Reibung zwischen Stahlkufe und Eisfläche beim Schlittschuhlauf. Durch den starken Druck, den das Gewicht (*G*) des Schlittschuhläufers auf der schmalen Berührungsfläche zwischen Kufe und Eis erzeugt, verflüssigt sich das Eis in dieser schmalen Zone zu Wasser (Relegation des Eises) und bildet den die Reibung stark herabsetzenden Flüssigkeitsfilm (Abb. 4). In allen Fällen, ob großer oder kleiner Reibungswiderstand, setzt sich die zu seiner Überwindung erforderliche Energie zum größten Teil in die ungeordnete Form der Wärme um (Reibungswärme) – so hat der Mensch auf einer primitiven Zivilisationsstufe Feuer angefacht (Abb. 5a). Bei der Reibung zwischen Rad und Straße bzw. Schiene erhitzt die dabei auftretende Reibungswärme die Reifen bzw. Spurkränze.
Die bewegungshemmende Funktion des Reibungswiderstandes – den man möglichst niedrig halten will, wenn es darum geht, eine Bewegung aufrechtzuerhalten – benutzt man aber auch umgekehrt, wenn man eine Bewegung abbremsen will. Dann wird man alles daransetzen, die Reibung zwischen den Berührungsflächen zu vergrößern, wie dies zum Beispiel bei den Bremsen unserer Autos mittels des Bremsbelages geschieht (Abb. 5b und 5c).
Auch der normale Stelzenlauf von Mensch und Tier setzt Reibungskräfte zwischen Fuß und Boden voraus (Abb. 6a, S. 17), wie das „Ausrutschen" beweist, wenn der Reibungswiderstand durch eine Öl- oder Eisschicht am Boden herabgesetzt wird (Abb. 6b, S. 17). Schraube und Nagel verbinden Teile dadurch fest miteinander, daß sie durch Reibungskräfte gehindert werden, sich zu lösen (Abb. 7a und 7b, S. 17). Die Reibung dient aber auch der Kraftübertragung in Reibungs-(Friktions-)Getrieben und Kupplungen, beispielsweise beim Auto (Abb. 8, S. 17). Obwohl beim Reibungsvorgang der überwiegende Anteil der dabei umgewandelten Energie in Wärme übergeht, finden doch auch Umsetzungen in andere Energieformen statt, zum Beispiel in elektrische und akustische. So beobachtet man elektrische Aufladungen, wenn man beispielsweise einen Isolator – etwa eine Schallplatte – mit einem Tuch reibt; sie machen sich dadurch bemerkbar, daß Staub und Stoffäden angezogen werden. Die so erzeugte elektrische Aufladung bezeichnet man als Reibungselektrizität. Eine Umsetzung in akustische Energie äußert sich für uns im Quietschen eines Lagers oder im Knarren von Scharnieren einer Tür; aber auch die Schwingungsanregung einer Violinsaite durch den Geigenbogen gehört zu diesen Erscheinungen. Sie beruhen darauf, daß der Reibungswiderstand zwischen gegeneinander reibenden Berührungsflächen größer ist als zwischen bewegten (Abb. 9).

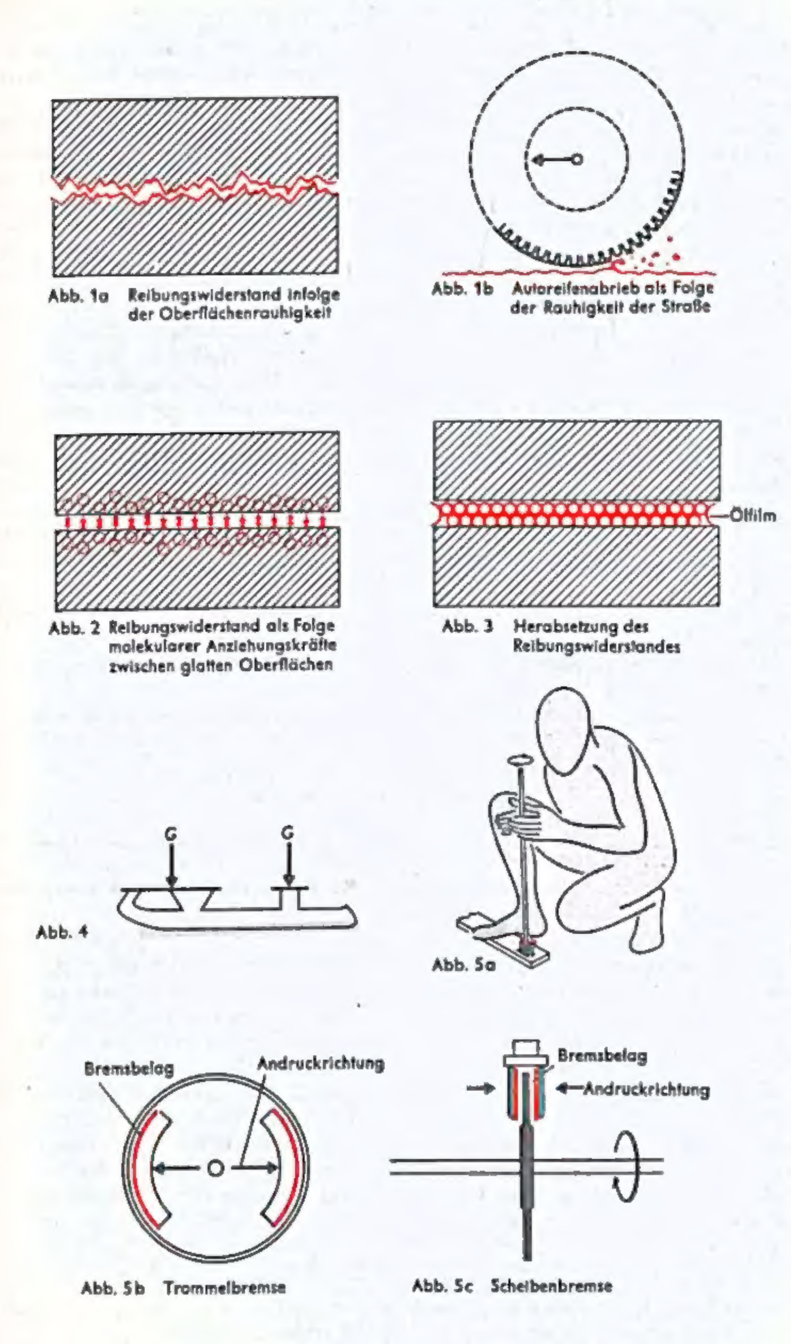


Abb. 1a Reibungswiderstand infolge der Oberflächenrauhigkeit

Abb. 1b Autoreifenabrieb als Folge der Rauhigkeit der Straße

Abb. 2 Reibungswiderstand als Folge molekularer Anziehungskräfte zwischen glatten Oberflächen

Abb. 3 Herabsetzung des Reibungswiderstandes

Abb. 4

Abb. 5a

Abb. 5b Trommelbremse

Abb. 5c Scheibenbremse

REIBUNG II

Außer der gleitenden Reibung, bei der man zwischen Reibung der Ruhe und Reibung der Bewegung zu unterscheiden hat, gibt es auch noch eine *rollende Reibung*, die beim Abrollen von der elastischen Verformung verursacht wird, welche die Kraft (Gewicht) hervorruft, mit der der abrollende Körper auf seiner Unterlage lastet.

Dadurch, daß dieser Druck in der vorderen Hälfte der Berührungsfläche (in der Rollrichtung gerechnet) größer ist als im hinteren Teil, wo ihn die elastische Nachwirkung zum Teil kompensiert, entsteht ein bremsendes Drehmoment, das der Belastung proportional ist. Je elastischer (d.h. auch härter) die Unterlage ist, desto größer ist die elastische Nachwirkung und damit um so kleiner das bremsende Moment bzw. die rollende Reibung. Dieser Eigenschaft der rollenden Reibung bedient man sich bei den Kugel-, Rollen- und Wälzlagern, in denen man die gleitende Reibung von Achsen in Lagern durch die rollende Reibung ersetzt, um die Reibungsverluste auf ein Minimum herabzudrücken (vgl. S. 206ff.). Umgekehrt benutzt man beim Abbremsen die rollende Reibung z.B. zwischen Autoreifen und Straße als zusätzlichen Reibungswiderstand zusammen mit der Bremswirkung zwischen Bremsbacke und Radtrommel bzw. -scheibe. Jedem Kraftfahrer ist es zum Beispiel geläufig, daß die Bremswirkung gerade mit Hilfe der rollenden Reibung ihr Maximum erreicht: Denn bremst man zu stark, so wird das Rad blockiert, die (kleinere) gleitende Reibung zwischen Rad und Straße kann den Wagen nicht mehr in der Spur halten, das Fahrzeug kommt ins Schleudern.

Die Gesetze des Reibungswiderstandes gehen auf A. Coulomb zurück. Er fand:

1. Der Reibungswiderstand ist proportional der Kraft (z.B. Gewicht), mit dem der gleitende Körper auf seiner Unterlage lastet.
2. Der Reibungswiderstand ist bei gleicher Last unabhängig von der Größe der Berührungsfläche.

Der Reibungswiderstand R ist eine Kraft, deren Richtung in der Berührungsfläche liegt, und die – ähnlich wie der Trägheitswiderstand – als Reaktionskraft gegenüber jeder von außen angreifenden Kraft auftritt. Ihrer Größe nach ist sie der senkrecht auf die Berührungsfläche wirkenden Lastkraft N proportional, so daß gilt:

$$R = \mu_R \cdot N \quad \text{bzw.} \quad \mu_R = \frac{R}{N},$$

wobei der mit μ_R bezeichnete Proportionalitätsfaktor Reibungskoeffizient genannt wird. In der Regel gibt man für die gleitende Reibung, für die Coulomb die obigen Regeln ableitete, den Reibungskoeffizienten der Bewegung an. Sein Wert liegt dabei für die Reibung von Metall gegen das gleiche Metall zwischen $\mu_R = 0{,}15$ bis $\mu_R = 0{,}50$ ($\mu_R = 0{,}07$ bei geöltem Metall); für die Reibung von Holz gegen Holz bei $\mu_R = 0{,}40$ (bei geglätteten Berührungsflächen). Die Coulombschen Gesetze gelten überhaupt nur unter Versuchsbedingungen, bei denen äußerste Sauberkeit herrscht. Ihre Gültigkeit ist beschränkt bei der Anwendung von Schmiermitteln zur Herabsetzung der Reibung. Als solche wirken nicht nur Öl und Wasser, sondern auch Graphit, Talk, Schmierseife. Dann gilt speziell das 2. Coulombsche Gesetz nicht mehr, denn die Dicke des Schmiermittelfilmes zwischen den Berührungsflächen hängt von dem Druck ab, und dieser ist bei gleicher Lastkraft für kleinere Berührungsflächen größer, so daß das Schmiermittel leichter zwischen den Berührungsflächen herausgedrückt wird. Ein entsprechender Zusammenhang wie zwischen der Kraft der gleitenden Reibung und der Lastkraft besteht zwischen dem Bremsmoment der Rollreibung M_R und der Lastkraft N:

$$M_R = \rho \cdot N \quad \text{bzw.} \quad \rho = \frac{M_R}{N},$$

wobei ρ den Reibungskoeffizienten der rollenden Reibung bedeutet. Während μ_R eine unbenannte Zahl ist, hat ρ auf Grund seiner Definitionsgleichung, die der Quotient eines Drehmomentes (M_R) mit einer Kraft (N) ist, die Dimension [cm].

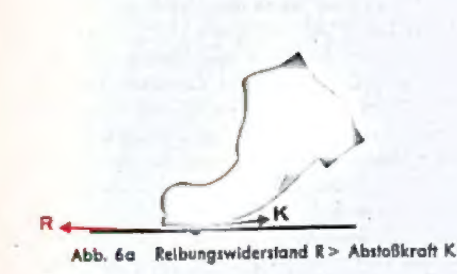


Abb. 6a Reibungswiderstand R > Abstoßkraft K

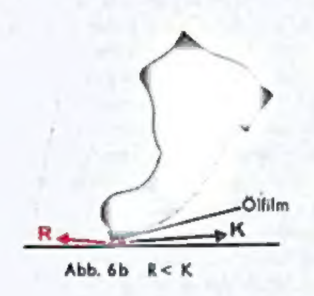


Abb. 6b R < K

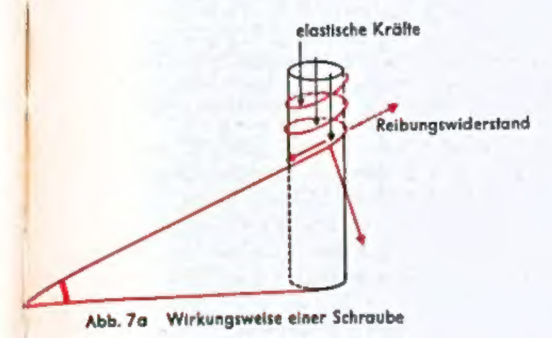


Abb. 7a Wirkungsweise einer Schraube

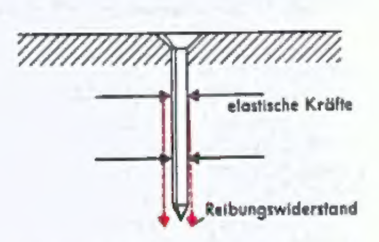


Abb. 7b Wirkungsweise eines Nagels

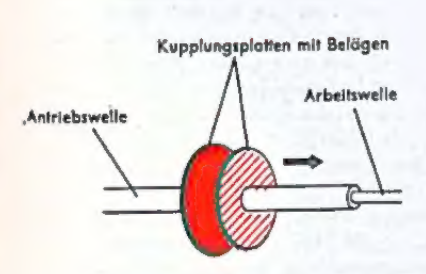


Abb. 8 Prinzip der Reibungskupplung beim Kraftfahrzeug
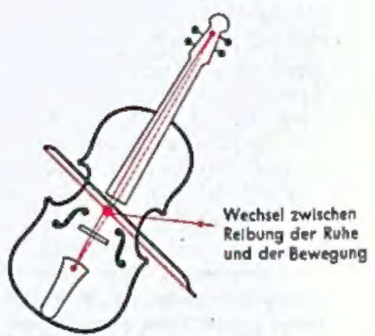


Abb. 9 Schwingungsanregung einer Violinsaite durch Reibung

BERNOULLISCHE GLEICHUNG

Strömt Gas oder eine Flüssigkeit durch ein Rohr mit einer Verengung, dann beobachtet man, daß der Druck p des strömenden Mediums auf die Wand des Rohres im Bereich der Verengung kleiner ist als im Bereich des weiten (normalen) Querschnitts. Bestimmt man die Strömungsgeschwindigkeit im weiten und engen Rohrteil, so findet man, daß die Strömungsgeschwindigkeit v im weiten Rohrteil kleiner als im verengten Teil ist. Die Beziehung zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Rohrquerschnitt ergibt die sog. Kontinuitätsgleichung, die für inkompressible Flüssigkeiten besagt, daß das Produkt aus Rohrquerschnitt F und Strömungsgeschwindigkeit v immer konstant und gleich dem Durchflußvolumen Q (pro Zeiteinheit) ist: $F \cdot v =$ konst. $= Q$. Bei kleinerem Querschnitt muß also die Geschwindigkeit größer sein, damit Q konstant bleibt.
Druck, Strömungsgeschwindigkeit und Dichte bestimmen die Energie des strömenden Mediums. Die Energie darf sich aber (abgesehen von Verlusten durch Reibung) nicht ändern (Gesetz von der Erhaltung der Energie). Es gilt daher die Energiebilanz: E an Stelle 1 $= E$ an Stelle 2 (Abb. 1). Hieraus folgt für inkompressible (nicht zusammendrückbare) Flüssigkeiten die Bernoullische Gleichung

$$p_1 + \frac{1}{2}\,\varrho\, v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\,\varrho\, v_2^2.$$

p_1 bzw. p_2 bezeichnet den statischen Druck an der Stelle 1 bzw. 2 (Druck auf die Rohrwand), $\frac{1}{2}\,\varrho\, v_1^2$ bzw. $\frac{1}{2}\,\varrho v_2^2$ den Staudruck. Hierbei ist ϱ die Dichte und v_1 bzw. v_2 die Geschwindigkeit der Flüssigkeit oder des Gases. Die Summe aus statischem Druck und Staudruck nennt man den Gesamtdruck; er macht sich in einem der Flüssigkeit entgegengerichteten Rohr bemerkbar und kann so gemessen werden (Pitot-Rohr). Aus der Formel erkennt man: Je höher der statische Druck an einer Stelle ist, desto geringer ist die Geschwindigkeit des strömenden Mediums an dieser Stelle (und umgekehrt). Liegt das System nicht waagerecht, so muß man noch die verschiedenen Höhenlagen der betrachteten Stellen in die Gleichung einführen.
Eine Anwendungsmöglichkeit dieser Gesetze ist in Abb. 2 dargestellt: Wird der statische Druck in der eingeschnürten Stelle geringer als der äußere Luftdruck, so wird aus dem Becherglas Wasser angesaugt, das Glas leert sich schnell. Diesen Effekt benützt man bei der Wasserstrahlpumpe (Abb. 3). Durch die Düse schießt ein Wasserstrahl mit großer Geschwindigkeit in ein erweitertes Rohr. Den Stutzen schließt man an ein geschlossenes Gefäß an. Weil der Wasserstrahl die gesamte in dem Gefäß und in der Leitung befindliche Luft mitreißt und mit sich wegführt, wird der Behälter „luftleer" gepumpt (evakuiert).
Eine Verbesserung dieser Anlage ist der Dampfstrahl-Luftsauger, bei dem anstelle des Wassers Wasserdampf von erhöhtem Druck eingesetzt wird (Abb. 4). Auch das Funktionieren des Tragflügels bei einem Flugzeug (s. S. 582) läßt sich mit der Bernoullischen Gleichung erklären, ebenso die Tatsache, daß in der Duschkabine der Vorhang nach innen gezogen wird, wenn die Brause läuft. Durch das schnell strömende Wasser wird die Luft in der Kabine mitgerissen und bekommt so eine größere Geschwindigkeit als die Luft außerhalb, die ja praktisch in Ruhe ist; die daraus resultierende Druckdifferenz drückt den Vorhang nach innen.
Gase folgen in gewissem Ausmaße wie Flüssigkeiten der Bernoullischen Gleichung. Läßt man eine Gasströmung mit großer Geschwindigkeit am oberen Ende eines Röhrchens, dessen unteres Ende in eine Flüssigkeit taucht, vorbeistreichen, so steigt die Flüssigkeit in dem Röhrchen auf und wird am oberen Ende von der Gasströmung mitgerissen. Dies ist das Funktionsprinzip des Vergasers (siehe S. 526 ff.) und des Parfümzerstäubers (Abb. 5).

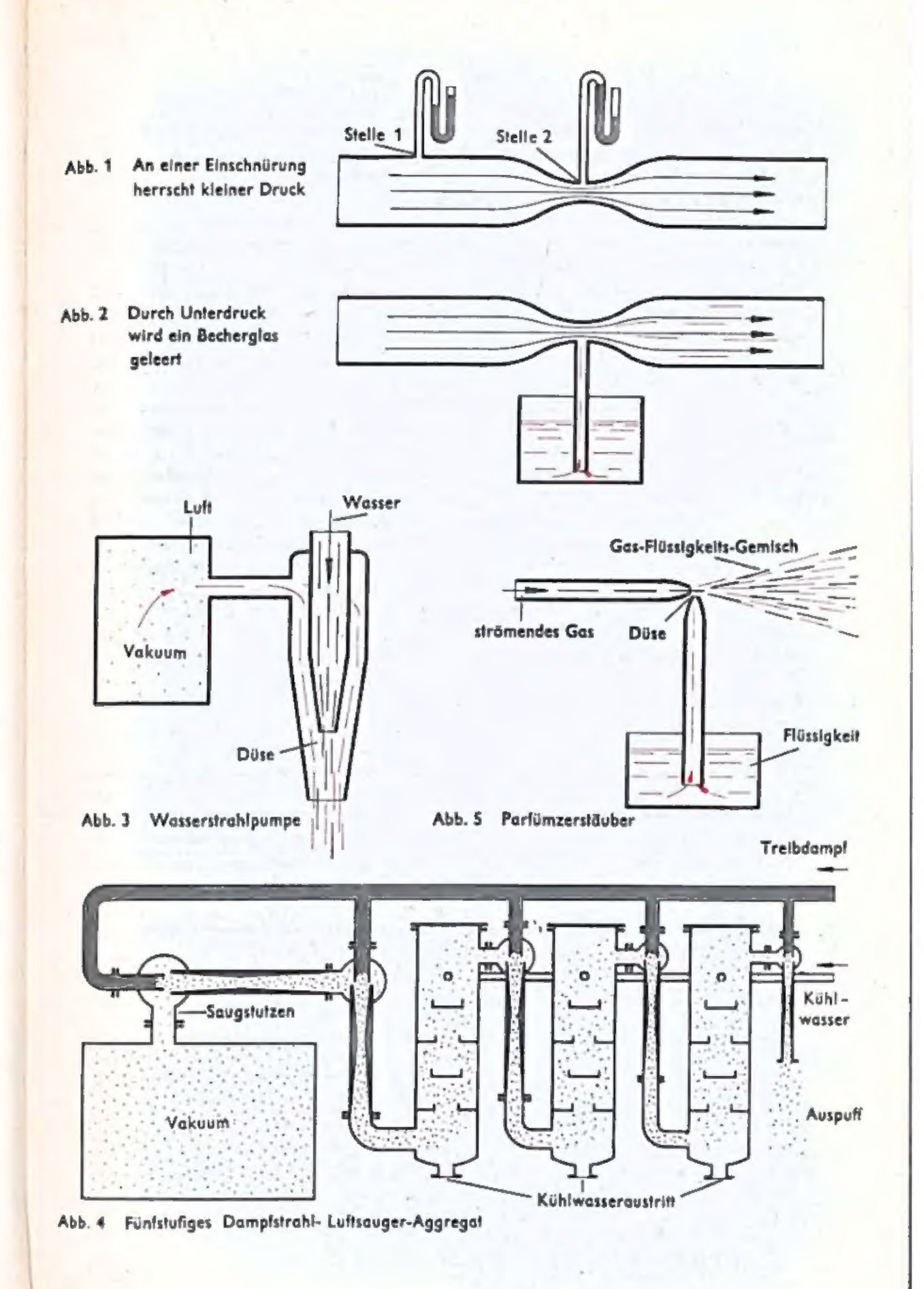


Abb. 1 An einer Einschnürung herrscht kleiner Druck

Abb. 2 Durch Unterdruck wird ein Becherglas geleert

Abb. 3 Wasserstrahlpumpe

Abb. 5 Parfümzerstäuber

Abb. 4 Fünfstufiges Dampfstrahl- Luftsauger-Aggregat

KRAFT, MASSE, IMPULS, DREHMOMENT I

Überall in der Natur und in der Technik, wo frei bewegliche Körper ihren Bewegungszustand ändern (also beschleunigt oder verzögert werden) oder festgehaltene Körper eine Verformung erfahren, ist die Ursache dafür die Einwirkung einer *physikalischen Kraft*. Erfahrungsgemäß sind beide Wirkungen bereits mit der menschlichen *Muskelkraft* erzielbar. Man denke z. B. an das Werfen eines Balles, an das Spalten von Holz mit der Axt, an die Formgebung von metallischen Gegenständen (glühende Hufeisen, Schmuck) durch Hämmern. An der Muskelkraft läßt sich auch schon ein Kennzeichen einer jeden Kraft feststellen, nämlich daß sie eine vektorielle (d. h. gerichtete) physikalische Größe ist: Ihre eindeutige Beschreibung erfordert neben der Angabe ihrer Größe (Stärke) stets die Angabe der Richtung, in der sie wirkt, und der Lage ihrer *Wirkungslinie*. Ein Maß für die Stärke einer Kraft ist das Produkt aus der Beschleunigung a, die sie einem Körper der Masse m erteilt, und der Masse selbst: $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$. Dabei machen die Pfeile über den physikalischen Zeichen deutlich, daß hier vektorielle Größen (Vektoren) vorliegen. Die *Beschleunigung*, d. h. die zeitliche Änderung der Geschwindigkeit (sie stellt ebenfalls eine gerichtete physikalische Größe dar), erfolgt im allgemeinen in Richtung der Kraft. Voraussetzung dabei ist, daß die Masse als konstant angesehen werden darf, was bei Geschwindigkeiten, die klein gegen die Lichtgeschwindigkeiten sind, möglich ist. Je größer also die Masse eines Körpers ist, umso kleiner ist die ihm von einer Kraft bestimmter Stärke erteilte Beschleunigung. Die Masse kann daher als Maß für den Widerstand eines Körpers gegen Änderungen seines Bewegungszustandes, also für seine *Trägheit*, angesehen werden. Die Proportionalität von Kraft und Beschleunigung erlaubt eine dynamische Kraftmessung, d. h., Kräfte werden durch Vergleich der an der gleichen Masse hervorgerufenen Beschleunigungen gemessen. Eine korrekte Definition der Kraft liefert das *Newtonsche Grundgesetz:* Eine Kraft ist die Ursache der zeitlichen Änderung (Ableitung nach der Zeit t) des Impulses $\vec{p}$ eines Körpers und dieser Änderung gleich: $\vec{F} = d\vec{p}/dt$.
Der *Impuls* eines Körpers ist dabei durch das Produkt seiner Masse m mit seiner Geschwindigkeit $\vec{v}$ gegeben: $\vec{p} = m\vec{v}$.
Eine Kraft wird im allgemeinen an einem Körper in einem bestimmten Punkt, dem *Angriffspunkt*, angreifen. Aber nur bei Formänderungen eines Körpers kommt es auf die Lage des Angriffspunktes auf der Wirkungslinie der Kraft an. Bei Einwirken auf einen starren Körper (in der Praxis können alle Körper, bei denen die Verformung vernachlässigbar klein ist, als starre Körper angesehen werden) kann der Angriffspunkt längs der Wirkungslinie beliebig verschoben werden, ohne daß sich die Wirkung der Kraft auf den Körper ändert, d. h. ohne daß ein bestehendes Gleichgewicht mit anderen Kräften gestört wird bzw. die von der Kraft verursachte Beschleunigung des starren Körpers sich ändert. In Abb. 6 ist das so dargestellt, daß die Muskelkraft an einem Mauerhaken direkt oder aber an irgendeinem Punkt, der in Richtung der Kraftwirkung liegt, mit der gleichen Wirkung angreifen kann.

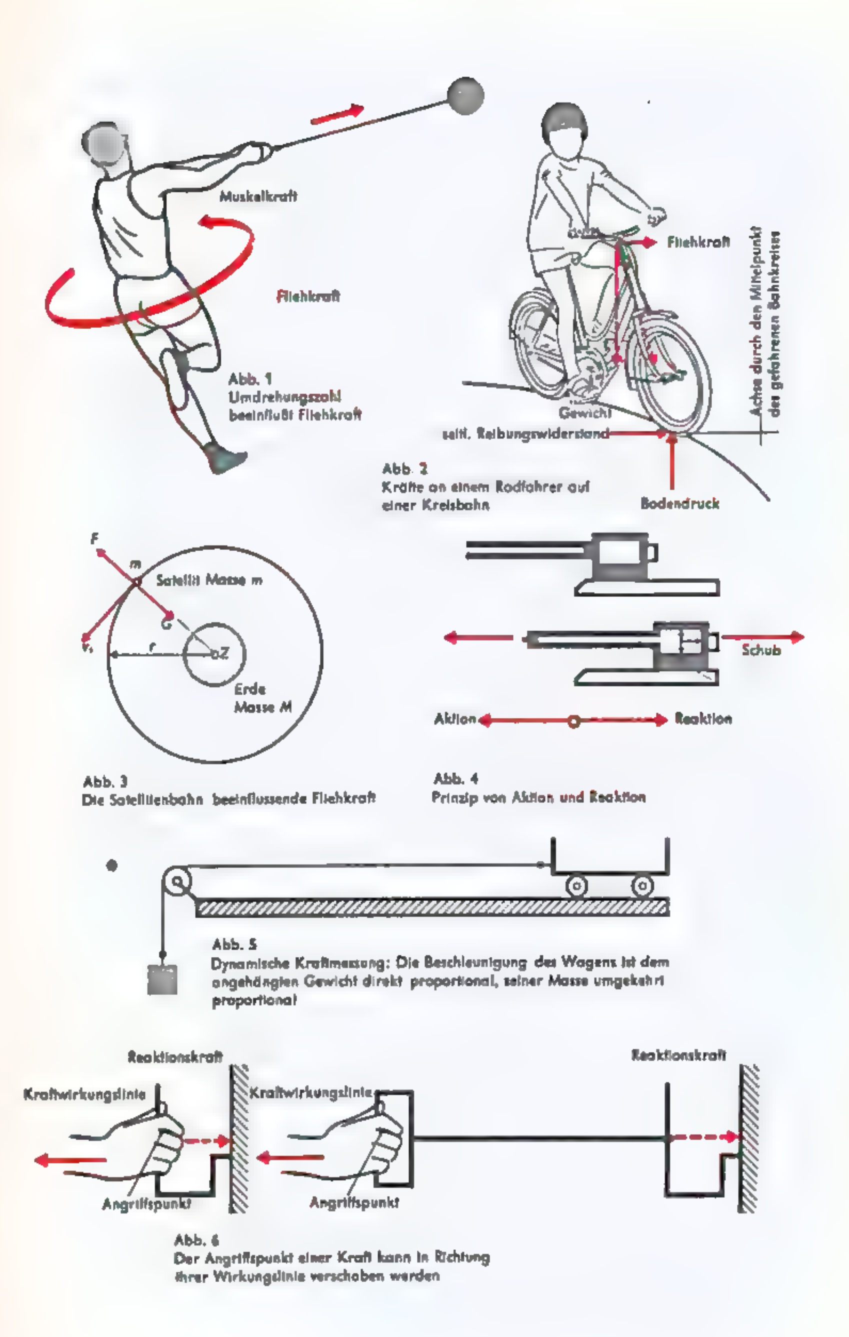


Abb. 1
Umdrehungszahl beeinflußt Fliehkraft

Abb. 2
Kräfte an einem Radfahrer auf einer Kreisbahn

Abb. 3
Die Satellitenbahn beeinflussende Fliehkraft

Abb. 4
Prinzip von Aktion und Reaktion

Abb. 5
Dynamische Kraftmessung: Die Beschleunigung des Wagens ist dem angehängten Gewicht direkt proportional, seiner Masse umgekehrt proportional

Abb. 6
Der Angriffspunkt einer Kraft kann in Richtung ihrer Wirkungslinie verschoben werden

KRAFT, MASSE, IMPULS, DREHMOMENT II

Die Zusammensetzung von zwei an einem Körper angreifenden Kräften $\vec{F}_1$ und $\vec{F}_2$ zu einer resultierenden Einzelkraft (*Resultante oder Gesamtkraft*) $\vec{F}$ und die Zerlegung einer Kraft $\vec{F}$ in Komponenten (d. h. in Teilkräfte $\vec{F}_1$ und $\vec{F}_2$, die jeweils in vorgegebene Richtungen wirken) erfolgt wie bei allen gerichteten Größen (Vektoren) mit Hilfe des sogenannten *Kräfteparallelogramms:* Die beiden zu addierenden Kräfte werden längs ihrer Wirkungslinien so verschoben, daß ihre Angriffspunkte zusammenfallen; sie bilden dann die zwei Seiten eines Parallelogramms, dessen größere (mit einem Richtungssinn versehene) Diagonale gleich der Summe $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}$, dessen kleinere Diagonale gleich der Differenz $\vec{F}_1 - \vec{F}_2$ beider Kräfte ist. Man kann auch so verfahren, daß man beide Kräfte aneinander setzt (die Spitze des einen Kraftvektors ist der Fußpunkt des anderen). Bei mehreren im gleichen Angriffspunkt angreifenden Kräften erhält man auf diese Weise zusammen mit der resultierenden Gesamtkraft ein *Krafteck (Kräftepolygon)*. Insbesondere stehen n Kräfte $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \ldots, \vec{F}_n$ miteinander im Gleichgewicht, wenn für sie gilt: $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots + \vec{F}_n = 0$, d. h., wenn ihre Resultante verschwindet. So steht jede an einem Körper angreifende Kraft mit der von ihr verursachten gleichgroßen, aber entgegengesetzt gerichteten *Reaktionskraft* im Gleichgewicht. Zwei entgegengesetzt gleich große gerichtete Kräfte, deren Wirkungslinien nicht zusammenfallen, lassen sich hingegen nicht zu einer Resultierenden zusammenfassen; sie bilden ein sogenanntes *Kräftepaar*, das auf einen starren Körper ein *Drehmoment* ausübt und ihn zu einer Drehung um einen bestimmten Drehpunkt veranlaßt.

Kräfte treten in allen Bereichen der Physik auf. Die wichtigsten Arten sind: 1. die verschiedenen *Reibungskräfte* (s. Reibung, S. 14 ff.); 2. die *elastischen Kräfte*, die bei Verformungen von Körpern im Innern als Reaktionskräfte wirksam werden; 3. die *Gravitationskräfte* (Schwerkräfte), die bewirken, daß zwischen allen Körpern fortwährend eine Anziehung besteht. Die Schwerkraft (oder Gravitation) der Erde ist z. B. verantwortlich für den freien Fall eines Körpers, der bei Vernachlässigbarkeit des Luftwiderstandes mit der Fallbeschleunigung $g = 9{,}81\ \mathrm{m/s^2}$ erfolgt, für die Krümmung der Wurfparabel eines geworfenen Balles bzw. eines abgeschossenen Projektils, für die Bewegung des Mondes und von künstlichen Satelliten (Raumflugkörpern) um die Erde, schließlich auch für das Gewicht $G = m \cdot g$ eines Körpers; 4. die *Coulomb-* oder *elektrostatischen Kräfte*, mit denen sich elektrische Ladungen anziehen oder abstoßen; 5. die *magnetostatischen Kräfte*, die Magnete aufeinander ausüben; 6. die verschiedenen Kräfte, die neben den elektrostatischen Kräften im Bereich der Moleküle, Atome und Atomkerne eine wesentliche Rolle spielen und entweder die Bindung der Atome zu Molekülen und Kristallen oder (als *Kernkräfte*) den Zusammenhalt der Atomkerne bewirken.

Als Maßeinheiten der Kraft werden in der Physik vor allem das Newton (N) und das Dyn (dyn), in der Technik noch das Kilopond (kp) verwendet: 1 kp ist dabei das Gewicht einer Masse von 1 Kilogramm (kg) an einer Stelle der Erdoberfläche, an der Normalfallbeschleunigung $g_n = 9{,}80665\ \mathrm{m/s^2}$ gemessen wird. Es gilt: $1\ \mathrm{kp} = 9{,}80665\ \mathrm{N}$ und $1\ \mathrm{N} = 10^5\ \mathrm{dyn} = 1\ \mathrm{mkg/s^2}$.

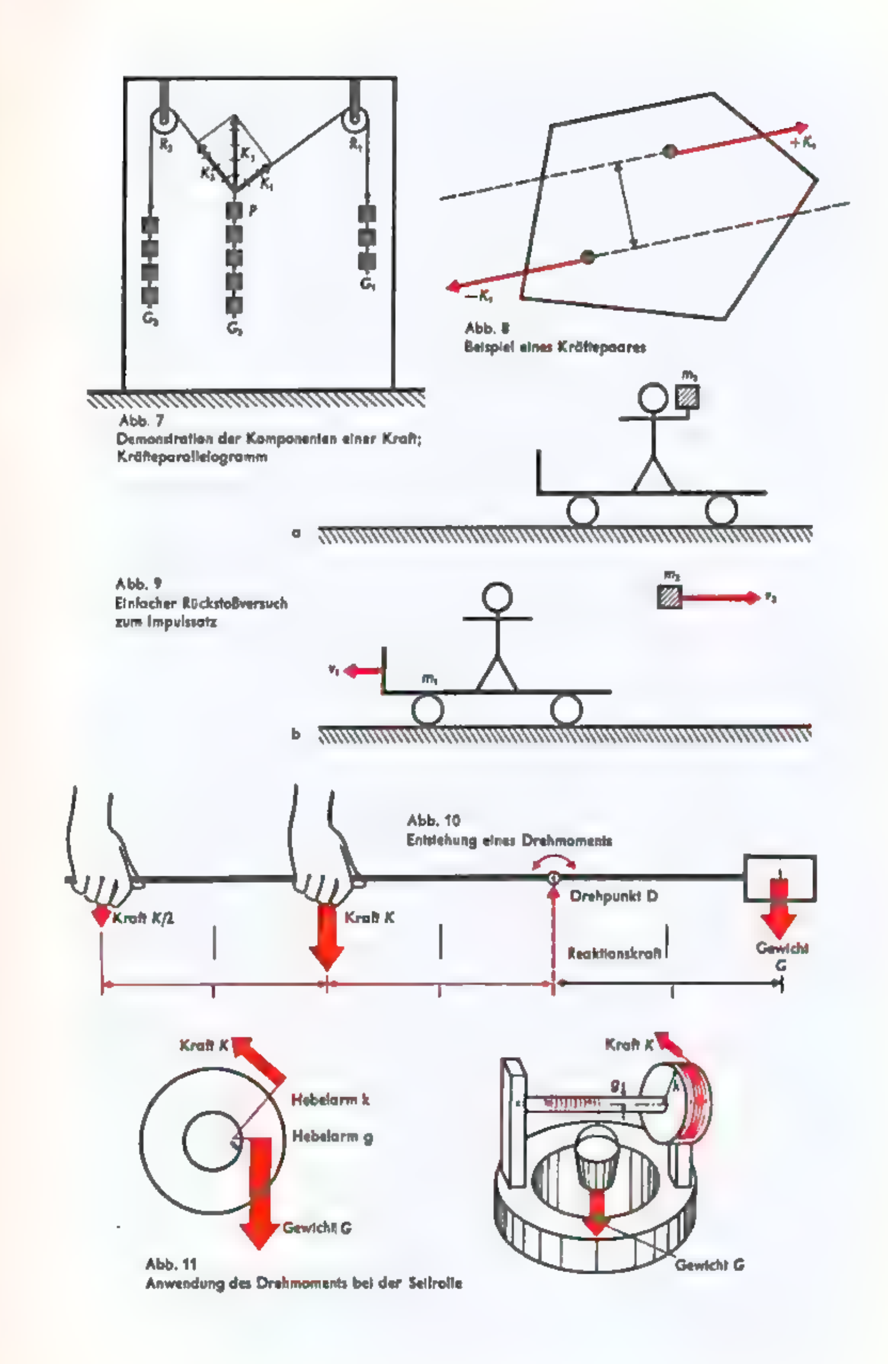


Abb. 7
Demonstration der Komponenten einer Kraft; Kräfteparallelogramm

Abb. 8
Beispiel eines Kräftepaares

Abb. 9
Einfacher Rückstoßversuch zum Impulssatz

Abb. 10
Entstehung eines Drehmoments

Abb. 11
Anwendung des Drehmoments bei der Seilrolle

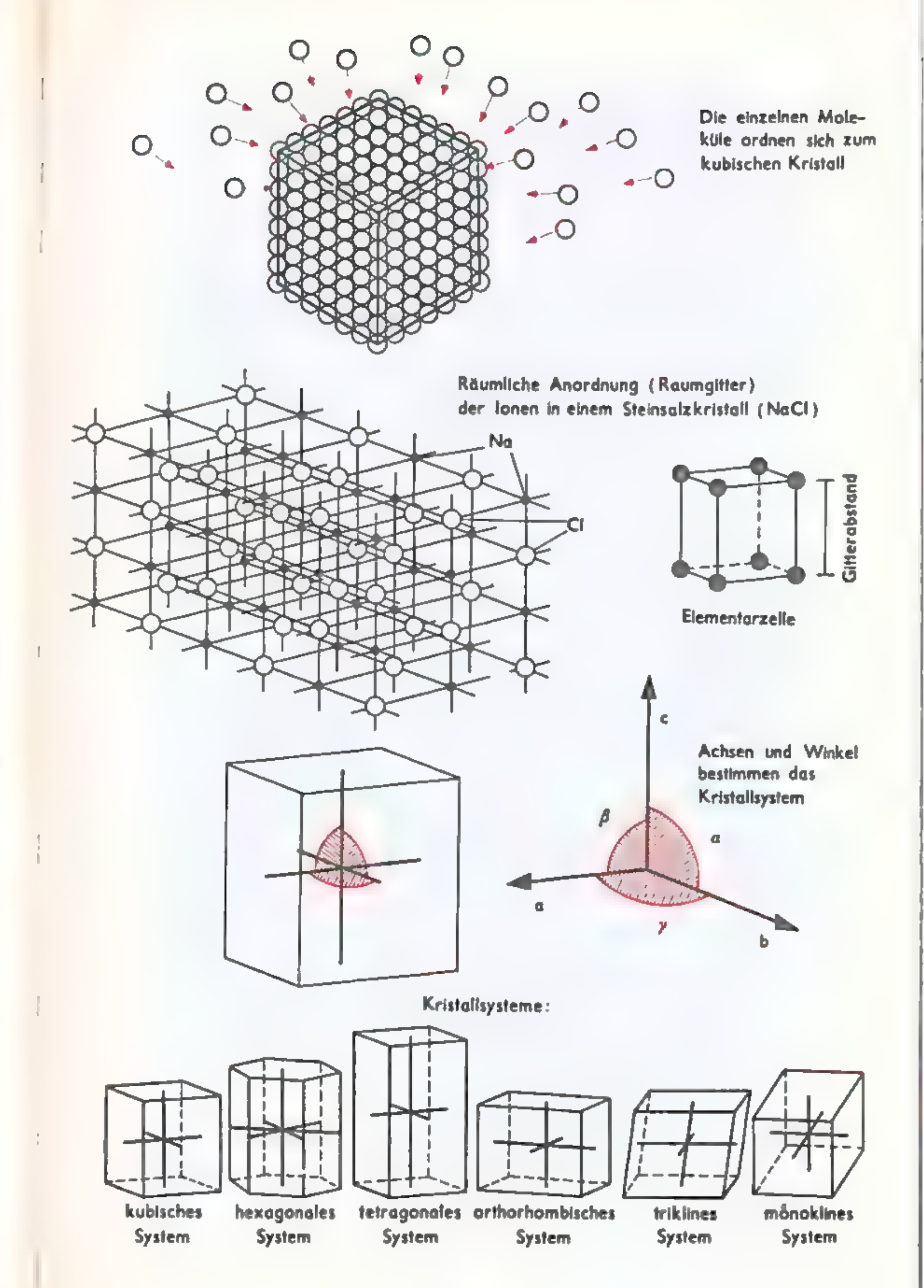
KRISTALLE

Stoffe, die glatte Begrenzungsflächen besitzen, die in regelmäßig wiederkehrenden Winkeln aufeinandertreffen, und die in unterschiedlicher Richtung jeweils andere Eigenschaften (Spaltbarkeit, Ritzbarkeit, Härte, Lichtbrechung usw.) haben, sind Kristalle. Diese Eigenschaften sind die Folge einer ganz bestimmten Ordnung, nach der sich der Kristall aus kleinsten Einheiten aufbaut (vgl. S. 26 ff.). Unsere stoffliche Welt ist in immer kleinere Teile teilbar. Einen Nagel kann man so lange halbieren und die Hälften immer wieder halbieren, bis es schließlich nicht mehr möglich ist, weil das kleinste mit normalen mechanischen Kräften nicht mehr teilbare Atom oder Molekül oder Ion erhalten wird. Sind diese Atome, Ionen oder Moleküle in einer Lösung, Schmelze oder in einem Dampf frei beweglich und erlauben es die Umweltbedingungen (Temperatur, Konzentration usw.), daß die Lösung oder der Dampf übersättigt wird oder die Schmelze zu erstarren beginnt, dann ordnen sich die Atome, Ionen oder Moleküle und lagern sich aneinander. Dabei ist es ihr Ziel, so viele Partner um sich zu vereinigen, wie es der Platz erlaubt. Die äußere Struktur der kleinsten Teilchen bestimmt dabei, unter welchem Winkel und in welcher Reihenfolge die Aneinanderlagerung erfolgt. Hierbei können sehr komplizierte Verhältnisse herrschen. Der „einfache" Stoff Wasser z. B., der ja in Wirklichkeit sehr kompliziert aufgebaut ist, hat so viele Möglichkeiten des Aneinanderkristallisierens, daß schließlich Hunderte von Kristallformen entstehen. Betrachtet man aber die regelmäßigen Schneekristalle aufmerksam, dann findet man, daß eine ganz bestimmte Symmetrie auftritt und es mitunter ganz leicht ist, den Kristall um z. B. 60° zu drehen, ohne daß man eine Veränderung bemerkt (falls die Kristallstrahlen gleich und unverletzt sind).

Aufgrund ihrer Symmetrieeigenschaften kann man die Kristalle in 32 Kristallklassen einteilen, die sich ihrerseits aus 230 verschiedenen Raumgruppen aufbauen. Für eine Raumgruppe müssen bestimmte Symmetrieelemente zusammenwirken (Symmetriezentren, Spiegelebenen, Drehachsen, Drehspiegelachsen, Schraubenachsen). Die wichtigsten Kristallsysteme sind das kubische, das hexagonale, das tetragonale, das rhombische, das monokline, das trigonale und das trikline System. Innerhalb jedes der Kristallsysteme gibt es recht unterschiedliche Kristallformen. Manche Stoffe können wie das Wasser in Hunderten unterschiedlicher Kristallformen vorkommen, die miteinander in Tausenden von Kombinationen auftreten. Kalkspat hat z. B. solche Eigenschaften. Ein kleiner Kristall von der Größe eines Fliegenauges (0,1 mm Kantenlänge) enthält dabei immerhin schon rd. 10^{19} Atome, Ionen oder Moleküle und die Kante eines solchen winzigen Kriställchens wird von 400000 Atomen, Ionen oder Molekülen aufgebaut, die alle in einer absolut präzisen Gerade gelagert sein können. Für die Technik noch interessanter sind allerdings die Kristalle mit Fehlstellen (s. Halbleiter S. 312).

Die Mehrzahl aller festen Stoffe ist aus Kristallen aufgebaut. Alle Metalle bestehen aus zum Teil winzigen Kriställchen, nahezu alle Gesteine sind kristallin aufgebaut. Neben diesen winzigen Kriställchen existieren aber auch kubikmetergroße Riesenkristalle z. B. aus Kochsalz.

Um einen bestimmten Kristall in sein Kristallsystem einordnen zu können, denkt man sich drei durch einen Schnittpunkt verlaufende Achsen im Innern des Kristalles und prüft, unter welchem Winkel sich die Achsen schneiden und welche Längenverhältnisse sie haben. Ein Kristall z. B., der durch drei gleichlange, vertauschbare, unter je 90° sich schneidende Achsen beschrieben werden kann, gehört zu einer der fünf Kristallklassen des kubischen Systems. Der Zusammenhalt der Materie in den Kristallen kann auf Ionenbindung (z. B. Kochsalz), auf kovalenter Bindung (z. B. Diamant), auf metallischer Bindung (z. B. Kupfer), auf van-der-Waalsschen Kräften (z. B. Naphthalin) und auf Wasserstoffbrückenbindung beruhen. Die Kraft der Bindung bestimmt Härte und Schmelzverhalten der Kristalle.



PERIODENSYSTEM DER CHEMISCHEN ELEMENTE I

Das Periodensystem der chemischen Elemente (Abk. PSE) stellt eine systematische Anordnung der z. Z. bekannten 105 chemischen Elemente in einer Tafel dar, der die Gesetzmäßigkeiten des atomaren Aufbaus der Elemente und die davon abhängigen physikalischen und chemischen Eigenschaften zugrunde liegen. Das erste brauchbare PSE wurde unabhängig voneinander 1869 von D. J. Mendelejew und L. Meyer aufgestellt.

Die Einordnung der Elemente in das PSE erfolgt einerseits nach steigender Ordnungszahl (Zahl der Protonen im Atomkern) und andererseits nach den durch die Anzahl der Protonen bedingten Elektronen, die sich in bestimmten Schalen um den Atomkern gruppieren und die chemischen und physikalischen Eigenschaften eines Elements bestimmen. Das PSE gliedert sich in *Perioden (Reihen)* und *Gruppen (Spalten)*. In den Gruppen sind (bedingt durch ähnliche Elektronenanordnung) Elemente gleicher chemischer Eigenschaften zusammengefaßt. Das Atomgewicht nimmt dabei in jeder Gruppe von oben nach unten zu. Man unterscheidet zwischen Hauptgruppen (a) und Nebengruppen (b), wobei v. a. die Hauptgruppen, nach ihren charakteristischen Vertretern besondere Namen tragen. In der ersten Hauptgruppe stehen die Alkalimetalle mit den Elementen Li, Na, K, Rb, Cs, Fr, in der zweiten Hauptgruppe die Elemente der Erdalkalimetalle (Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra), die dritte Hauptgruppe wird als Borgruppe bezeichnet, die vierte als Kohlenstoffgruppe, die fünfte als Stickstoffgruppe, die Elemente der sechsten Hauptgruppe sind die Chalkogene, die siebente Hauptgruppe umfaßt die Halogene, die achte die Edelgase.

Aufbau der Elektronenschalen: Das am einfachsten gebaute Element, der Wasserstoff, besitzt im elektrisch neutralen Zustand ein Proton, das von einem Elektron umkreist wird. Dieses Elektron befindet sich im Grundzustand in der 1. Schale (auch K-Schale genannt). Das Helium als nächstfolgendes Element mit zwei Protonen besitzt zwei Elektronen, die sich ebenfalls in der K-Schale befinden. Mit diesen zwei Elektronen ist die K-Schale bereits gefüllt und die erste Periode abgeschlossen, es beginnt beim Lithium (mit der Ordnungszahl 3) der Aufbau der 2. Schale (L-Schale), wobei vom Lithium zum Neon fortschreitend jeweils ein Elektron mehr in der L-Schale angeordnet wird. Beim Neon ist auch die L-Schale (8 Elektronen) gefüllt. Jede Schale kann maximal $2\,n^2$ Elektronen aufnehmen (n = Zahl der Schale), so daß die 1. Schale nach 2, die 2. nach 8, die 3. nach 18, die 4. nach 32 Elektronen ihr maximales Fassungsvermögen erreicht haben. Bei der 5., 6. und 7. Schale wird das mögliche Elektronenaufnahmevermögen nicht mehr voll ausgenutzt. Nach dem Ausbau der 2. Schale beim Edelgas Neon beginnt mit dem Alkalimetall Natrium (Ordnungszahl 11) der Ausbau der 3. Schale (M-Schale), der beim Edelgas Argon mit acht Elektronen ein vorläufiges Ende findet. Das auf das Argon folgende Alkalimetall Kalium (Ordnungszahl 19) beginnt den Ausbau der 4. Schale (N-Schale), der jedoch nach dem Element Calcium unterbrochen wird. Durch die folgenden zehn Elemente, die als *Nebengruppe erster Art* bezeichnet werden (Scandium bis Zink), wird bei theoretisch gleichbleibender, in Wirklichkeit jedoch wegen Umbesetzungen schwankender Elektronenanordnung der äußersten Schale die 3. Schale auf 18 Elektronen aufgefüllt. Erst durch die auf das Zink folgenden Hauptgruppenelemente Gallium bis Krypton wird die 4. Schale auf 8 Elektronen aufgefüllt. Die 4. Periode umfaßt somit insgesamt 18 Elemente (8 Hauptgruppenelemente und 10 Nebengruppenelemente). Der gleiche Vorgang wie in der 4. Periode tritt auch in der 5. Periode beim Aufbau der 5. Schale (O-Schale) auf. Auch hier wird nach den zwei Anfangselementen (Rubidium und Strontium) eine Reihe von zehn Nebengruppenelementen (Yttrium bis Cadmium) eingeschoben, die die 4. Schale auf 18 (von 32 möglichen) Elektronen auffüllen.

PERIODENSYSTEM DER CHEMISCHEN ELEMENTE

(angegeben Ordnungszahl, Elementsymbol, Name, Atomgewicht sowie in kursiver Schrift die Anzahl der Elektronen in den jeweils im Aufbau befindlichen Schalen; Nebengruppenelemente 1. und 2. Art rot schraffiert)

Periode	aufgebaute Schalen	Gruppe I a b	Gruppe II a b	Gruppe III b a	Gruppe IV b a	Gruppe V b a	Gruppe VI b a	Gruppe VII b a	Gruppe VIII (Gruppe VIII b)			Gruppe 0 (Gruppe VIII a)
1	1. (K)	1 H Wasserstoff 1,008 1										2 He Helium 4,003 2
2	2. (L)	3 Li Lithium 6,940 1	4 Be Beryllium 9,013 2	5 B Bor 3 10,82	6 C Kohlenstoff 4 12,011	7 N Stickstoff 5 14,006	8 O Sauerstoff 6 16,000	9 F Fluor 7 19,00				10 Ne Neon 20,183 8
3	3. (M)	11 Na Natrium 22,990 1	12 Mg Magnesium 24,32 2	13 Al Aluminium 3 26,982	14 Si Silicium 4 28,09	15 P Phosphor 5 30,975	16 S Schwefel 6 32,066	17 Cl Chlor 7 35,457				18 Ar Argon 39,944 8
4	3. (M) 4. (N)	19 K Kalium 39,100 1	20 Ca Calcium 40,08 2	21 Sc Scandium 1 44,96 2	22 Ti Titan 2 47,90 2	23 V Vanadin 3 50,95 2	24 Cr Chrom 5 52,01 1	25 Mn Mangan 5 54,94 2	26 Fe Eisen 6 55,85 2	27 Co Kobalt 7 58,94 2	28 Ni Nickel 8 58,71 2	
	3. (M) 4. (N)	29 Cu 10 Kupfer 1 63,540	30 Zn 10 Zink 2 65,38	31 Ga 10 Gallium 3 69,72	32 Ge 10 Germanium 4 72,60	33 As 10 Arsen 5 74,91	34 Se 10 Selen 6 78,96	35 Br 10 Brom 7 79,916				36 Kr Krypton 10 83,80 8
5	4. (N) 5. (O)	37 Rb Rubidium 85,48 1	38 Sr Strontium 87,63 2	39 Y Yttrium 1 88,92 2	40 Zr Zirkonium 2 91,22 2	41 Nb Niob 4 92,91 1	42 Mo Molybdän 5 95,95 1	43 Tc Technetium 6 (99) 1	44 Ru Ruthenium 7 101,1 1	45 Rh Rhodium 8 102,91 1	46 Pd Palladium 10 106,4	
	4. (N) 5. (O)	47 Ag 10 Silber 1 107,880	48 Cd 10 Cadmium 2 112,41	49 In 10 Indium 3 114,82	50 Sn 10 Zinn 4 118,70	51 Sb 10 Antimon 5 121,76	52 Te 10 Tellur 6 127,61	53 J 10 Jod 7 126,91				54 Xe Xenon 10 131,30 8
6	5. (O) 6. (P)	55 Cs Cäsium 132,91 1	56 Ba Barium 137,36 2	57 La *) Lanthan 1 138,92 2	72 Hf Hafnium 2 178,50 2	73 Ta Tantal 3 180,95 2	74 W Wolfram 4 183,86 2	75 Re Rhenium 5 186,22 2	76 Os Osmium 6 190,2 2	77 Ir Iridium 7 192,2 2	78 Pt Platin 9 195,09 1	
	5. (O) 6. (P)	79 Au 10 Gold 1 197,00	80 Hg 10 Quecksilber 2 200,61	81 Tl 10 Thallium 3 204,39	82 Pb 10 Blei 4 207,21	83 Bi 10 Wismut 5 209,00	84 Po 10 Polonium 6 (210)	85 At 10 Astat 7 [210]				86 Rn Radon 10 [222] 8
7	6. (P) 7. (Q)	87 Fr Francium [223] 1	88 Ra Radium [226,05] 2	89 Ac **) Actinium 1 [227] 2	104 Kurtschatovium	105						

*) Lanthanoide (Nebengruppe zweiter Art)

O	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd 1	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu 1
P	Cer 2	Praseodym 2	Neodym 2	Promethium 2	Samarium 2	Europium 2	Gadolinium 2	Terbium 2	Dysprosium 2	Holmium 2	Erbium 2	Thulium 2	Ytterbium 2	Lutetium 2
N	140,13 2	140,92 3	144,27 4	(147) 5	150,35 6	152,0 7	157,26 7	158,93 9	162,51 10	164,94 11	167,27 12	168,94 13	173,04 14	174,99 14

**) Actinoide (Nebengruppe zweiter Art)

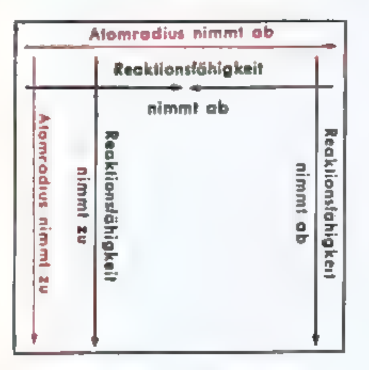
	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
P	Thorium 2	Protacti- 1	Uran 1	Neptu- 1	Plutonium 1	Ameri- 1	Curium 1	Berke- 1	Califor- 1	Einstei- 1	Fer- 1	Mende- 1	Nobelium 1	Lawren- 1
Q	2	nium 2	2	nium 2	2	cium 2	2	lium 2	nium 2	nium 2	mium 2	levium 2	2	cium 2
O	232,05	[231] 2	238,07 3	[237] 4	(242) 5	[243] 6	[247] 7	[247] 8	(249) 9	[254] 10	[253] 11	[256] 12	[254] 13	[257] 14

PERIODENSYSTEM DER CHEMISCHEN ELEMENTE II

Auch die 5. Periode umfaßt dadurch 18 Elemente. In der 6. Periode beginnt zunächst mit den Elementen Cäsium und Barium der Aufbau der 6. Schale (P-Schale), das darauffolgende Lanthan beginnt den Ausbau der 5. Schale. Die auf das Lanthan folgenden 14 Elemente (Cer bis Lutetium), die als *Nebengruppe 2. Art* oder *Lanthanoide* bezeichnet werden, vollenden jedoch erst den Aufbau der 4. Schale bis zum maximalen Fassungsvermögen von 32 Elektronen. Beim Element Hafnium (Ordnungszahl 72) setzt sich der Aufbau der 5. Schale fort, der beim Element Quecksilber (Ordnungszahl 80) einen vorläufigen Abschluß erreicht. Die Hauptgruppenelemente Thallium bis Radon besorgen den Ausbau der 6. Schale auf acht Elektronen. Die 6. Periode umfaßt somit 32 Elemente (8 Hauptgruppenelemente, 10 Elemente der Nebengruppe erster Art und 14 Elemente der Nebengruppe 2. Art). Der Verlauf des Elektronenschalenaufbaus der 7. Periode (7. Schale, Q-Schale) entspricht dem der 6. Schale, die hier nach dem Actinium (Ordnungszahl 89) folgenden 14 Elemente, die den Ausbau der 5. Schale auf 32 Elektronen besorgen (Thorium bis Lawrencium) werden als Actinoide bezeichnet. Von den auf das Lawrencium folgenden Elementen müßte der Ausbau der 7. Schale auf acht Elektronen vollendet werden, jedoch ist über die Elektronenanordnung beim Element Kurtschatovium sowie beim Element 105 noch nichts sicheres bekannt. Das nächste Hauptgruppenelement wird beim Element mit der Ordnungszahl 113 erwartet.
Durch den sich stetig in gesetzmäßiger Reihenfolge wiederholenden Aufbau der Elektronenschalen sind auch die physikalischen und chemischen Gesetzmäßigkeiten des Periodensystems bestimmt. Grundlage aller chemischen Reaktionen der Atome eines Elements ist das Bestreben durch die Bildung von Verbindungen eine energetisch begünstigte Achterschale zu erreichen, wie sie bei den Edelgasen vorliegt und deren chemische Reaktionsträgheit begründet. Zur Erlangung dieser Achterschalen können die Atome entweder Elektronen in ihre Schale aufnehmen, abgeben oder Elektronen gemeinsam mit anderen Atomen teilen.
Die Elemente der 1., 2. und 3. Hauptgruppe des Periodensystems besitzen jeweils ein, zwei oder drei Elektronen in ihren Außenschalen. Durch Abgabe dieser Elektronen und Bildung ein- bis dreiwertiger positiver Ionen sind sie befähigt, die Edelgasschale des jeweils vorangehenden Edelgases zu erreichen. Die Atome des Natriums erreichen durch Abgabe ihres einen Außenelektrons z. B. die Edelgasschale des Neons (unter Bildung positiver Natriumionen), die Atome des Calciums durch Abgabe ihrer zwei Außenelektronen die Edelgasschale des Argons unter Bildung zweiwertig positiver Calciumionen. Die Atome der Elemente der 6. bis 7. Hauptgruppe können durch Aufnahme von Elektronen anderer Atome die Edelgasschale des nächstfolgenden Edelgases erreichen unter Bildung ein- bis zweiwertig negativ geladener Ionen. Die Atome des Chlors gehen z. B. unter Aufnahme eines Elektrons in die Edelgasschale des Argons über (unter Bildung einwertig negativer Chlorionen), die Atome des Selens erreichen durch die Aufnahme von zwei Elektronen die Edelgasschale des Kryptons (unter Bildung zweiwertig negativ geladener Selenionen). Bei den Elementen der 4. und 5. Hauptgruppe werden keine Ionen gebildet, diese Elemente erreichen ihre Edelgasschalen durch gemeinsame Benutzung der Elektronen anderer Elemente.

	I. Gruppe	II. Gruppe	III. Gruppe	IV. Gruppe	V. Gruppe	VI. Gruppe	VII. Gruppe	VIII. Gruppe
1. Periode	Wasserstoff H							Helium He
2. Periode	Lithium Li	Beryllium Be	Bor B	Kohlenstoff C	Stickstoff N	Sauerstoff O	Fluor F	Neon Ne
3. Periode	Natrium Na	Magnesium Mg	Aluminium Al	Silicium Si	Phosphor P	Schwefel S	Chlor Cl	Argon Ar
4. Periode	Kalium K	Calcium Ca	Gallium Ga	Germanium Ge	Arsen As	Selen Se	Brom Br	Krypton Kr
5. Periode	Rubidium Rb	Strontium Sr	Indium In	Zinn Sn	Antimon Sb	Tellur Te	Jod J	Xenon Xe
6. Periode	Cäsium Cs	Barium Ba	Thallium Tl	Blei Pb	Wismut Bi	Polonium Po	Astat At	Radon Rn
7. Periode	Francium Fr	Radium Ra						

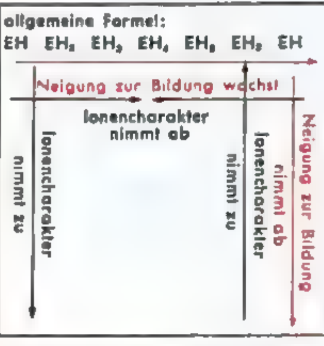
Verteilung von Metallen (rot schraffiert), amphoteren Elementen (schwarz schraffiert) und Nichtmetallen (weiß) innerhalb der Hauptgruppen des Periodensystems



Gesetzmäßigkeit von Atomradius und Reaktionsfähigkeit innerhalb der Hauptgruppen des Periodensystems (ohne Edelgase)



Neigung zur Bildung positiver oder negativer Ionen innerhalb des Periodensystems (ohne Edelgase)



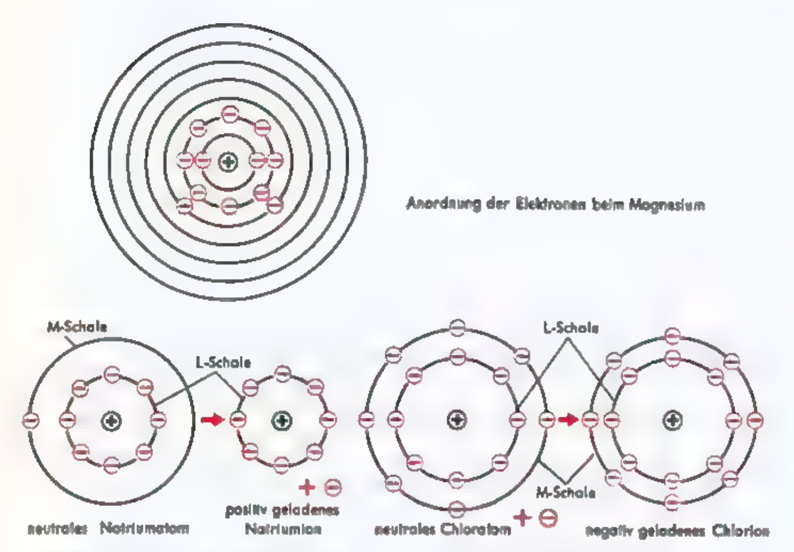
Systematik der Wasserstoffverbindungen (ohne Edelgase)



Systematik der Sauerstoffverbindungen (ohne Edelgase)

PERIODENSYSTEM DER CHEMISCHEN ELEMENTE III

Die Reaktionsfähigkeit der Elemente einer Gruppe nimmt von oben nach unten zu, da durch die zunehmende Anzahl der Elektronenschalen und den wachsenden Atomradius die Anziehungskraft des Atomkerns immer schwächer wird. Die reaktionsfähigsten Elemente befinden sich in der 1. Hauptgruppe des Periodensystems (Alkalimetalle), da hier nur ein relativ lockeres Außenelektron vorhanden ist. Innerhalb einer Periode nimmt die Reaktionsfähigkeit zunächst bis etwa zur 4. Gruppe ab, steigt dann jedoch wieder von der 5. bis zur 7. Gruppe an. Der Atomradius nimmt innerhalb einer Periode ab, da die zunehmende Anzahl der Außenelektronen und die wachsende Kernladungszahl durch gegenseitige Anziehungskräfte eine Verkleinerung des Atoms bewirken. Verbunden mit der abnehmenden Neigung der Elemente innerhalb einer Periode zur Bildung positiver Ionen ist auch ein gesetzmäßiger Übergang vom Metall zum Nichtmetall. In jeder Periode steht am Anfang ein Metall, in den mittleren Gruppen befinden sich sogenannte amphotere Elemente, die sich je nach Reaktionsbedingungen metallisch oder nichtmetallisch verhalten können, am Ende einer jeden Periode steht ein Nichtmetall. Innerhalb der Gruppen nimmt der metallische Charakter der Elemente von oben nach unten zu, da mit wachsendem Atomradius die Anziehungskräfte auf die Außenelektronen nachlassen und die Neigung zur Elektronenabgabe steigt.
Durch die Anzahl der Außenelektronen ist auch die Wertigkeit der Elemente festgelegt. Gegenüber Wasserstoff nimmt sie von der 1. bis zur 4. Hauptgruppe zu, dann von der 5. bis zur 7. Hauptgruppe wieder ab (Reihenfolge innerhalb der zweiten Periode LiH, BeH_2, BH_3, CH_4, NH_3, OH_2, FH). Die Wertigkeit gegenüber Sauerstoff nimmt innerhalb einer Periode zu (z. B. dritte Periode: Na_2O, MgO, Al_2O_3, SiO_2, P_2O_5, SO_3,Cl_2O_7).
Die Neigung zur Bildung von Wasserstoffverbindungen nimmt innerhalb einer Periode zu (verursacht durch die Neigung des Wasserstoffs zur Elektronenabgabe und die Neigung der Elemente der 5. bis 7. Hauptgruppe zur Elektronenaufnahme), die Neigung zur Bildung von Sauerstoffverbindungen nimmt innerhalb einer Periode ab (verursacht durch die Neigung des Sauerstoffs zur Elektronenaufnahme). Innerhalb einer Gruppe nimmt dagegen die Neigung zur Bildung von Wasserstoffverbindungen ab, die Neigung zur Bildung von Sauerstoffverbindungen zu. Je weiter zwei Elemente im PSE voneinander entfernt sind, umso größer ist ihre Neigung zur Bildung von Verbindungen mit Ionencharakter (durch Elektronenaufnahme des einen und Elektronenabgabe des anderen Elements), daher besitzen die Verbindungen der Elemente der 1. bzw. 2. Hauptgruppe mit den Elementen der 6. bzw. 7. Hauptgruppe des PSE überwiegend Ionencharakter.
Da bei den Elementen der Nebengruppen nicht die äußersten Elektronenschalen sondern (bei gleichbleibender Außenschale) weiter innen liegende Schalen aufgefüllt werden, zeigen diese Elemente untereinander große physikalische und chemische Übereinstimmung (ausschließlich Metalle, Neigung zur Bildung positiver Ionen). Diese Übereinstimmung gilt v. a. für die Lanthanoide und Actinoide, da bei ihnen nur die drittäußersten Schalen aufgefüllt werden.



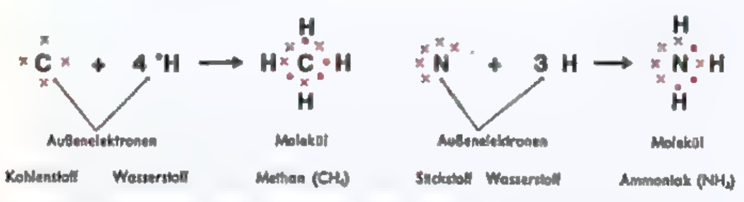
Anordnung der Elektronen beim Magnesium

Elemente der 1. bis 3. Hauptgruppe erreichen die Achterschale durch Abgabe ihrer Valenzelektronen (unter Bildung positiv geladener Ionen)

Elemente der 6. bis 7. Hauptgruppe erreichen die Achterschale durch Aufnahme von Elektronen in ihrer Außenschale (unter Bildung negativ geladener Ionen)



Beispiele aus Ionen aufgebauter Verbindungen, entstanden durch Elektronenabgabe bzw. -aufnahme der beteiligten Atome



Beispiele aus Atomen aufgebauter Verbindungen, entstanden durch gemeinsame Benutzung von Außenelektronen der beteiligten Atome

CHEMISCHE FORMELN UND CHEMISCHE REAKTIONSGLEICHUNGEN

Um die chemische Zusammensetzung von Molekülen und den Verlauf chemischer Reaktionen kurz und unmißverständlich ausdrücken zu können, wurde eine international gültige Schreibweise geschaffen. Jedes chemische Element wird dabei mit einem eigenen Symbol belegt (ein oder zwei Buchstaben), wobei sich die Symbole meist von dem lateinischen Namen der einzelnen Elemente herleiten (Abb. 1). Bei der Darstellung chemischer Verbindungen werden die Elementsymbole der am Aufbau der Verbindung beteiligten Elemente ohne Interpunktion aneinander gereiht (Abb. 2). Man gelangt auf diese Weise zur *Brutto-* oder *Summenformel*, die nur über die Mengenverhältnisse der an der Verbindung beteiligten Elemente Auskunft gibt, über die Art der chemischen Bindung unter den einzelnen Atomen jedoch nichts aussagt. Besteht ein Molekül aus einer größeren Anzahl verschiedener Elemente, so bilden diese meist Gruppen mit stärkerer Zusammengehörigkeit, diese Gruppen tragen oft eine elektropositive oder elektronegative Ladung. Die Kurzzeichen der Gruppen werden in der chemischen Formel gewöhnlich direkt nacheinander und in einer bestimmten Reihenfolge angegeben. Ist eine Gruppe in einem Molekül mehrfach vorhanden, so erscheint sie in runder Klammer, rechts unten nach der Klammer wird in arabischen Ziffern die Zahl ihrer Häufigkeit angegeben (Abb. 3). Chemisch verwandte Stoffe sind vielfach nach einem einheitlichen Formeltypus gebaut. So lautet die allgemeine Formel für Basen (Laugen) $Me_m (OH)_n$, wobei Me das den Laugen zugrunde liegende Metall, OH das bei den Laugen stets wiederkehrende Hydroxidion bedeutet, die Buchstaben *m* und *n* stehen für die Häufigkeit der Anteile. Oft werden durch weitere Zeichen Angaben über die Bindung zwischen Elementgruppen, über deren Wertigkeit und über die Verteilung der positiven und negativen Ladung innerhalb des Moleküls gemacht. Bei komplizierter gebauten Molekülen werden zur leichteren Übersicht stabile Komplexe in eckigen Klammern zusammengefaßt, die Anzahl dieser Komplexe kann ebenfalls durch tiefgestellte arabische Ziffern angegeben werden. Wertigkeiten eines Atoms oder Molekülteils werden durch hochgestellte arabische oder römische Ziffern angezeigt. Auch für die Reihenfolge der Elemente oder Gruppen innerhalb eines Moleküls bestehen bestimmte Vorschriften. So stellt man z. B. die positiv geladenen Atome oder Gruppen meist voran (Abb. 4).
Man unterscheidet in der Chemie zwei große Gruppen von Verbindungen: diejenigen der anorganischen Chemie (z. B. Salze, Minerale) und diejenigen der organischen Chemie (z. B. Fette, Eiweiße, Kohlehydrate). Die Verbindungen der anorganischen Chemie sind wesentlich einfacher gebaut als diejenigen der organischen Chemie. Dementsprechend ist die Zahl der Verbindungen der anorganischen Chemie mit etwa 60 000 wesentlich geringer als die der organischen Verbindungen (über 4 Millionen). Allen organischen Verbindungen liegt ein Skelett von Kohlenstoffatomen zugrunde, an das bestimmte Elemente oder Gruppen von Elementen gebunden sind. Dabei ist es entscheidend wie die einzelnen Bausteine zusammengefügt sind, ob das Kohlenstoffgerüst z. B. kettenförmig (acyclisch) oder ringförmig (cyclisch) gebaut ist, und an welchen Stellen des Moleküls weitere Verzweigungen hängen. Zwei Moleküle mit gleicher Bruttoformel können in ganz verschiedenen Strukturen auftreten, man spricht hier von Isomeren einer Bruttoformel. Während es in der anorganischen Chemie meist genügt, zur Beschreibung eines Moleküls die Bruttoformel anzugeben, wird in der organischen Chemie vor allem die *Strukturformel (Konstitutionsformel)* angegeben, d. h. eine Formel, die symbolhaft Aufschluß über die Verknüpfung der Atome und Gruppen gibt. Je nach Bedarf kann sie mehr oder weniger vereinfacht wiedergegeben werden. Abb. 5 zeigt die Möglichkeit anhand der relativ einfachen Isomerie Bruttoformel C_5H_{12}.

Abb. 1
Kurzzeichen einiger Elemente:

Wasserstoff (Hydrogenium) = H
Kohlenstoff (Carboneum) = C
Sauerstoff (Oxygenium) = O
Stickstoff (Nitrogenium) = N
Natrium (Natrium) = Na

Abb. 2
Schreibung chem. Formeln:

1 Atom H + 1 Atom Cl = HCl (Salzsäure)
2 Atome H + 1 Atom O = H_2O (Wasser)
1 Atom C + 2 Atome O = CO_2 (Kohlendioxid)

Abb. 3

Verbindung	Gruppen	richtig	falsch
Bittersalz	$Mg^{++} + SO_4^{--}$	$MgSO_4$	~~$SMgO_4$~~, ~~O_4MgS~~
Soda	$2\,Na^+ + CO_3^{--}$	Na_2CO_3	~~CNa_2O_3~~, ~~O_3Na_2C~~
Ammonsalpeter	$NH_4^+ + NO_3^-$	NH_4NO_3	~~NNH_4O_3~~, ~~$O_3N_2H_4$~~
Ammonium-carbonat	$2\,NH_4^+ + CO_3^{--}$	$(NH_4)_2CO_3$	~~$C(NH_4)_2O_3$~~, ~~$O_3(NH_4)_2C$~~

Abb. 4

Beispiel für eine komplizierte Formel:

$[Na_2\,Fe_3^{II}\,Fe_2^{III}\,(OH)_2]^{6+}\,[Si_8O_{22}]^{6-}$, eine Hornblende (Riebeckit), bestehend aus einem positiv geladenen Komplex mit zwei- und dreiwertigem Eisen und einem negativ geladenen Komplex.

Abb. 5 Mögliche Strukturen der Summenformel C_5H_{12}:

```
  H   H   H   H   H
HC – C – C – C – CH
  H   H   H   H   H
```

Strukturformel = $CH_3–CH_2–CH_2–CH_2–CH_3$
vereinfacht = $CH_3–(CH_2)_3–CH_3$

Pentan (n-Pentan)

```
              H
              CH
  H   H   H /
HC – C – C    H
  H   H     \ H
              CH
              H
```

= $CH_3–CH_2–CH(CH_3)_2$

2-Methyl-butan

```
 H        H
 HC       CH
 H  \   / H
      C          =    CH3  CH3
 H  /   \ H              \ /
 HC       CH              C
 H        H              / \
                      CH3  CH3
```

2,2-Dimethyl-propan

Abb. 6 Schreibung chemischer Reaktionsgleichungen:

NaOH (Natronlauge) + HCl (Salzsäure) → NaCl (Kochsalz) + H_2O (Wasser) — → zeigt Reaktionsrichtung

2 K (Kalium) + 2 H_2O (Wasser) → KOH (Kalilauge) + ↑H_2 — ↑ Reaktionsrichtung, entweicht gasförmig

$Ca(OH)_2$ (Calciumhydroxid) + CO_2 (Kohlendioxid) → $CaCO_3$↓ (Kalk) + H_2O — ↓ Reaktionsprodukt fällt aus

H_2 (Wasserstoff) + J_2 (Jod) ⇆ 2 HJ (Jodwasserstoff) — ⇆ Reaktion ist umkehrbar

GRUNDVERFAHREN DER CHEMIE

Trotz ihrer großen Vielzahl und ihres unterschiedlichen Verlaufs lassen sich die meisten chemischen Reaktionen als eine Aufeinanderfolge oder ein Zusammenwirken einiger Grundreaktionen darstellen. Zu den wichtigsten dieser Grundreaktionen bzw. Verfahren zählen die Oxydation, die Reduktion, die Neutralisation, die Hydrierung.

Als *Oxydation* bezeichnet man eine chemische Reaktion, bei der der Ladungszustand oder die Wertigkeitsstufe eines Elements oder einer Verbindung unter dem Einfluß eines *Oxydationsmittels* erhöht wird. Der einfachste Fall einer Oxydation ist die Verbrennung oder Umsetzung eines Stoffes mit Sauerstoff unter Bildung von *Oxiden*. Die Verbrennung von Schwefel mit Sauerstoff liefert z. B. Schwefeldioxid, SO_2, wobei der Schwefel aus seiner Nullwertigkeit in die positiv vierwertige Oxydationsstufe übergeht. Ebenfalls als Oxydation bezeichnet man die Abgabe von Wasserstoff aus einer Verbindung. Bromwasserstoff zerfällt z. B. beim Erhitzen in die Elemente, wobei das Brom aus seiner negativ einwertigen Oxydationsstufe in die Nullwertigkeit übergeht. Allgemein läßt sich die Oxydation eines Stoffes als *Elektronenabgabe* auffassen.

Verbunden mit jeder Oxydation eines Stoffes ist eine *Reduktion* des oxydierenden Stoffes. Im Falle des Schwefels wird der Sauerstoff z. B. reduziert, da er aus seiner Nullwertigkeit in die negativ zweiwertige Oxydationsstufe übergeht, im Falle des Bromwasserstoffs wird der Wasserstoff durch seinen Übergang von der positiv einwertigen Stufe zur Nullwertigkeit reduziert. Allgemein läßt sich die Reduktion eines Stoffes als *Elektronenaufnahme* auffassen. Der gleichzeitig verlaufende Vorgang der Oxydation und der Reduktion bei einer Umsetzung werden unter der Bezeichnung *Redoxsystem* zusammengefaßt.

Unter dem Begriff *Neutralisation* versteht man die Umsetzung einer Säure mit einer Base. *Säuren* sind chemische Verbindungen, die in wäßrigen Lösungen durch die Abspaltung positiv geladener Wasserstoffionen (H^+) gekennzeichnet sind. Die allgemeine Formel einer Säure lautet HR, wobei der Säurerest R entweder ein einzelnes, negatives Elemention darstellen oder einen negativen Komplex bedeutet. Zu der ersten Gruppe von Säuren zählt z. B. die Salzsäure, HCl, ein Vertreter der zweiten Grupe ist z. B. die Schwefelsäure, H_2SO_4. *Basen (Laugen)* sind durch die Abspaltung negativ geladener Hydroxylionen (OH^-) in wäßrigen Lösungen gekennzeichnet, ihre allgemeine Formel lautet Me(OH), wobei der Basenrest Me meist für ein positives Metallion, seltener für einen positiven Komplex steht. Beim Zusammenbringen gleicher Mengen Säure und Base findet eine Neutralisation statt, wobei sich die Wasserstoff- und Hydroxylionen unter Wasserbildung zusammenlagern, aus dem Basen- und Säurerest entsteht ein *Salz* der allgemeinen Formel MeR. Salze sind überwiegend aus Ionen aufgebaut, sie zeigen beim Lösen in Wasser die Eigenschaft der *Dissoziation*, d. h., sie zerfallen in positive und negative Ionen. Der *Neutralpunkt* einer Neutralisation ist derjenige Punkt, an dem die Konzentration der Wasserstoffionen (der Säure) ebenso groß ist wie die Konzentration der Hydroxylionen (der Base). Dieser Neutralpunkt wird mit Hilfe des *pH-Wertes* der Lösung bestimmt, er liegt beim pH-Wert 7. Zeigt eine Lösung einen pH-Wert unter 7, so reagiert sie sauer (Überschuß an Wasserstoffionen), liegt der pH-Wert über 7, reagiert die Lösung basisch (Überschuß an Hydroxylionen). Gemessen wird der pH-Wert mit Hilfe geeigneter Indikatoren, die im sauren Gebiet eine andere Farbe zeigen als im basischen (Lackmus, einer der häufigsten Indikatoren, ist im sauren Bereich z. B. rot, im basischen blau, beim pH-Wert 7 gelborange) oder durch Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit der Lösung.

Als *Hydrierung* bezeichnet man die Anlagerung von Wasserstoff an eine Verbindung, die Abspaltung von Wasserstoff ist eine *Dehydrierung*. Beide Verfahren spielen v. a. in der organischen Chemie eine große Rolle.

Oxydation

$2\,MgO \rightarrow Mg + O_2$; $Mg^{2+} + 2e^- \rightarrow Mg$
Magnesiumoxid Magnesium Sauerstoff

$2\,SO_3 \rightarrow 2\,SO_2 + O_2$; $S^{6+} + 2e^- \rightarrow S^{4+}$
Schwefeltrioxid Schwefeldioxid Sauerstoff

$N_2 + 3\,H_2 \rightarrow 2\,NH_3$; $N^0 + 3e^- \rightarrow N^{3-}$
Stickstoff Wasserstoff Ammoniak

Reduktion

$S + O_2 \rightarrow SO_2$; $S \rightarrow S^{4} + 4e^-$
Schwefel Sauerstoff Schwefeldioxid

$2\,Cu + O_2 \rightarrow 2\,CuO$; $Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$
Kupfer Sauerstoff Kupferoxid

$2\,HBr \rightarrow Br_2 + H_2$; $Br^- \rightarrow Br^0 + e^-$
Bromwasserstoff Brom Wasserstoff

Redoxsysteme

Oxydation
$Fe_2O_3 + 3C \rightarrow 2\,Fe + 3\,CO$
Reduktion
Eisenoxid Kohlenstoff Eisen Kohlenmonoxid

Oxydation
$CuO + H_2 \rightarrow Cu + H_2O$
Reduktion
Kupferoxid Wasserstoff Kupfer Wasser

Neutralisation

$Na\,[OH + H]\,Cl \rightarrow NaCl + HOH$ ($= H_2O$)
Natronlauge Salzsäure Natriumchlorid (Kochsalz) Wasser

$Ca(OH)_2 + H_2CO_3 \rightarrow CaCO_3 + 2\,H_2O$
Calciumhydroxid Kohlensäure Calciumcarbonat (Kalk) Wasser

Einteilen der Säuren und Basen nach dem pH-Wert

Neutralpunkt (7)
Schwache Säuren (4–7) · starke Basen (10–14)
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
starke Säuren (0–4) · schwache Basen (7–10)

Hydrierung

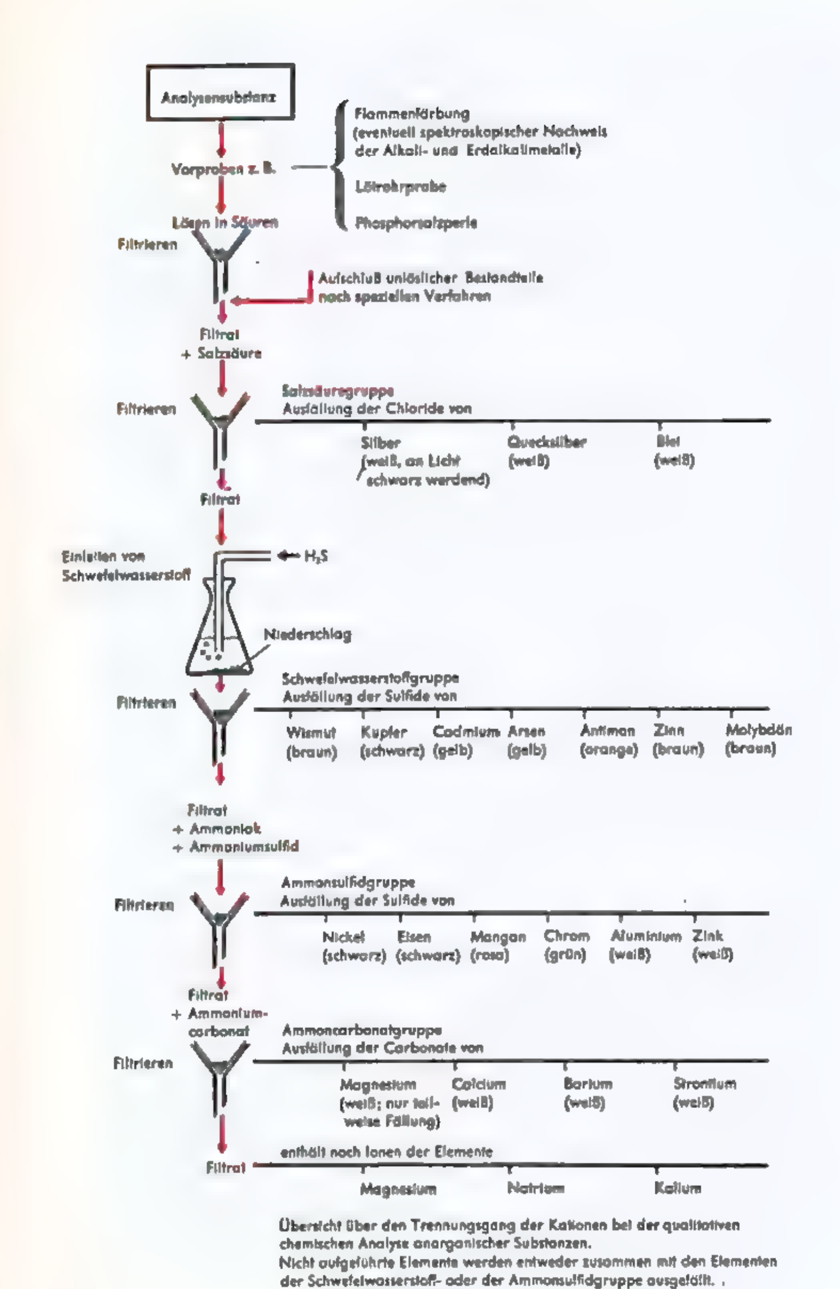
$C_2H_2 + 2\,H_2 \rightarrow C_2H_6$
Acetylen Wasserstoff Äthan

Hydratisierung

$C_2H_4 + H_2O \rightarrow C_2H_5OH$
Äthylen Wasser Äthylalkohol

CHEMISCHE ANALYSE I

Die chemische Analyse befaßt sich mit der Auftrennung von Stoffgemischen in ihre Einzelkomponenten und deren anschließende Identifizierung, der Ermittlung der eine Verbindung aufbauenden Bestandteile sowie der Ermittlung der strukturellen Anordnung der Atome oder Atomgruppen. Für diese Untersuchungen stehen der analytischen Chemie eine große Zahl von Verfahren zur Verfügung, es wird sowohl mit rein chemischen, physikalisch-chemischen und rein physikalischen Verfahren gearbeitet. Die Entscheidung, welches der verschiedenen Verfahren für den jeweiligen Zweck am besten geeignet ist, hängt ab von der Art der Analysensubstanz, der Frage, welche Bestandteile bestimmt werden sollen und von der Genauigkeit, mit der die Analyse ausgeführt werden soll. Rein chemische Nachweismethoden arbeiten relativ grob, d. h. die Mengen, bei denen ein Stoff noch einwandfrei identifiziert werden kann, liegen relativ hoch (10^{-2} bis 10^{-3} g). Wesentlich schärfer arbeiten die rein physikalischen Nachweismethoden, mit ihrer Hilfe ist es möglich, Stoffmengen in Konzentrationen von 10^{-12} bis 10^{-18} g noch sicher zu erfassen.
Es lassen sich zwei große Teilgebiete der chemischen Analyse unterscheiden, einmal die *qualitative Analyse*, die nur die Art der eine Verbindung aufbauenden Stoffe oder die Bestandteile eines Mengengemisches ermittelt, und zum anderen die *quantitative Analyse*, die die Menge der eine Verbindung aufbauenden Bestandteile oder die Menge der in einem Stoffgemisch enthaltenen Bestandteile feststellt. Voraussetzung für eine quantitative Analyse ist in den meisten Fällen die qualitative Analyse.
Qualitative Analyse anorganischer Verbindungen: Bei der qualitativen Analyse geht es darum, durch bestimmte, für die einzelnen Elemente charakteristische Nachweisreaktionen, die An- oder Abwesenheit des jeweiligen Elementes in der Analysensubstanz festzustellen. Da viele Elemente den einwandfreien Nachweis anderer Elemente stören würden, wird ein *Trennungsgang* durchgeführt, bei dem bestimmte Gruppen ähnlich reagierender Elemente durch geeignete Reagenzien von der Analysensubstanz abgetrennt werden. Diese Gruppen werden anschließend weiter zerlegt, bis ein einwandfreier Nachweis auf An- oder Abwesenheit eines Elementes durchführbar ist. Um den Trennungsgang so weit wie möglich zu vereinfachen, werden vor Beginn zunächst bestimmte *Vorproben* ausgeführt, deren Ausfall Hinweise auf die Zusammensetzung der Analysensubstanz liefert. Als sicherer Nachweis sind die Vorproben jedoch nur in den wenigsten Fällen geeignet. Zu den Vorproben zählen z. B. die *Flammenfärbung* der Bunsenbrennerflamme beim Glühen der Analysensubstanz, die sich in Verbindung mit einem Spektrometer jedoch bereits zum sicheren Nachweis der Alkali- und Erdalkalimetalle eignet (Natrium Gelb-, Kalium Violett-, Strontium Rot-, Barium Grünfärbung).
Ebenfalls als Vorprobe dient die *Phosphorsalzperle*, wobei die Analysensubstanz mit Natriummetaphosphat erhitzt wird. Die Färbung zeigt die Gegenwart bestimmter Metalle an (bei Kobalt blaue, bei Mangan violette, bei Chrom grüne Perle). Das Erhitzen im Glühröhrchen und die Untersuchung der entweichenden Gase sowie das Verhalten gegen verdünnte und konzentrierte Schwefelsäure liefern ebenfalls wichtige Hinweise auf die Zusammensetzung der Analysensubstanz.
Zur Durchführung des Trennungsganges muß die Analysensubstanz zunächst weitgehend in Lösung gebracht werden. Dies geschieht durch Lösen in verdünnter oder konzentrierter Salz-, Schwefel- oder Salpetersäure oder Gemischen verschiedener Säuren. Unlösliche Bestandteile werden abfiltriert und nach besonderen Methoden aufgeschlossen. Beim Trennungsgang werden die einzelnen Elementgruppen aufgrund der Bildung schwer löslicher Niederschläge mit bestimmten Reagenzien von der Analysenlösung abgetrennt, weiter aufgetrennt und die einzelnen Bestandteile durch Ausfällung oder Farbreaktionen identifiziert.



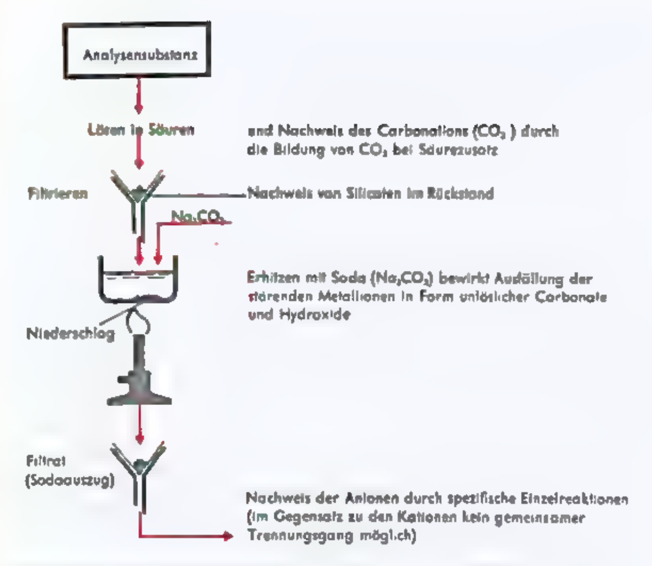
Übersicht über den Trennungsgang der Kationen bei der qualitativen chemischen Analyse anorganischer Substanzen.
Nicht aufgeführte Elemente werden entweder zusammen mit den Elementen der Schwefelwasserstoff- oder der Ammonsulfidgruppe ausgefällt.

CHEMISCHE ANALYSE II

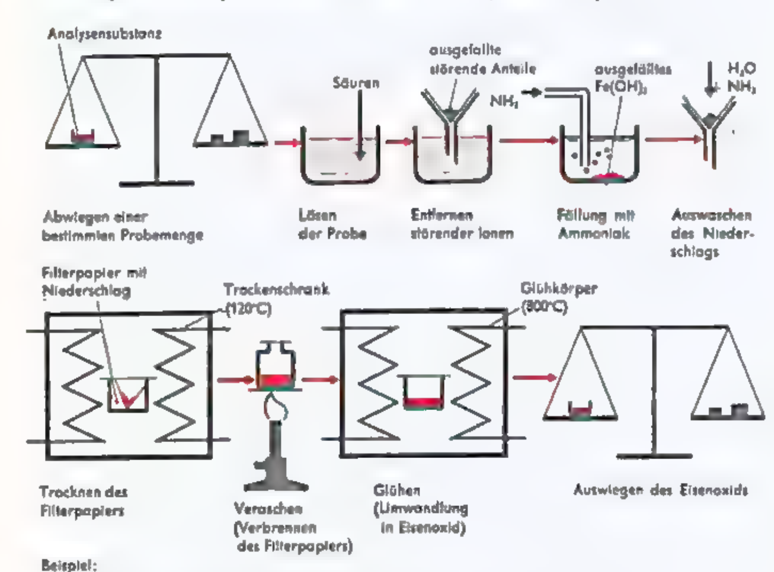
Die erste Gruppe wird als *Salzsäuregruppe* bezeichnet, sie umfaßt die drei Elemente Silber, Blei und Quecksilber, die bei Salzsäurezusatz in Form ihrer schwer löslichen Chloride aus der Analysensubstanz abgetrennt werden. Als nächstes werden die Elemente der *Schwefelwasserstoffgruppe* (Wismut, Kupfer, Cadmium, Arsen, Antimon, Zinn, Molybdän und andere Nebengruppenelemente) durch Einleiten von Schwefelwasserstoff in Form ihrer Sulfide ausgefällt. Aus der ammoniakalischen Lösung werden die Elemente der *Ammonsulfidgruppe* (Nickel, Eisen, Mangan, Aluminium, Chrom, Zink und einige Nebengruppenelemente) in Form ihrer schwerlöslichen Sulfide abgetrennt. Die letzte Gruppe umfaßt die Elemente der *Ammoniumcarbonatgruppe* (Alkali- und Erdalkalimetalle), die entweder mit Ammoniumcarbonat in Form der Carbonate ausgefällt werden oder (wie die Alkalimetalle) direkt aus der Analysensubstanz nachgewiesen werden. — Zum Nachweis der Anionen einer Analysensubstanz wird, da der Anionennachweis durch Schwermetalle gestört wird, ein *Sodaauszug* hergestellt, wozu die Analysenlösung mit Soda gekocht wird, die Anionen werden aufgrund charakteristischer Reaktionen im Filtrat nachgewiesen.

Qualitative Analyse organischer Verbindungen: Gegenüber der qualitativen Analyse anorganischer Verbindungen ist die organischer Verbindungen nur von untergeordneter Bedeutung, da organische Verbindungen nur aus wenigen Elementen (Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Phosphor, Halogene, Schwefel) aufgebaut sind. Zum Nachweis von Kohlenstoff dient die Oxydation zu Kohlendioxid, das als solches nachgewiesen wird, Wasserstoff wird zu Wasser oxydiert und nachgewiesen, Stickstoff in Ammoniak übergeführt oder mit der *Lassaigneschen Probe* in Cyanide umgewandelt. Halogene werden mit Hilfe der *Beilsteinschen Probe* (Flammenfärbung des Bunsenbrenners bei Zusatz von Kupferoxid) erfaßt. Schwefel wird durch Oxydation zu Sulfaten oder in Form schwer löslicher Sulfide nachgewiesen.

Quantitative Analyse anorganischer Verbindungen: Für die Durchführung einer quantitativen Analyse stehen viele geeignete Verfahren zur Verfügung. Man kann z. B. das zu bestimmende Element in Form schwer löslicher Salze aus der Analysensubstanz abtrennen und nach dem Trocknen oder der Umwandlung in stabile Oxide oder Salze gewichtsmäßig *(gravimetrisch)* bestimmen. Als *Maßanalyse* bezeichnet man Verfahren zur Ermittlung der Menge eines Stoffes durch Messung des Verbrauchs eines bestimmten Reagenzes, das mit dem zu bestimmenden Stoff in übersichtlicher Weise reagiert. Für die Bestimmung benötigt man Reagenzlösungen bestimmter Konzentrationen (Meßlösungen) sowie volumetrisch geeichte Gefäße (Pipetten, Büretten, Mensuren). Die volumetrische Bestimmung mit Meßlösungen wird auch als *Titration* bezeichnet. Die Konzentration der Meßlösung wird in Mol oder Grammäquivalent pro Liter angegeben. Als *Mol* eines Stoffes bezeichnet man die dem Molekulargewicht entsprechende Gewichtsmenge in Gramm, ein *Grammäquivalent* ist die dem Molekulargewicht in Gramm entsprechende Gewichtsmenge dividiert durch die Wertigkeit des betreffenden Ions. Als Reaktionen der Volumetrie kommen Fällungsreaktionen, bei denen der Endpunkt der Reaktion daran erkennbar ist, daß durch weiteren Reagenzzusatz keine Ausfällung mehr stattfindet, und auch Farbreaktionen in Frage, bei denen das Reaktionsende durch Auftreten, Verschwinden oder die Änderung von Färbungen angezeigt wird. Zur Kennzeichnung dieser Reaktionsendpunkte können auch bestimmte Indikatoren zugesetzt werden. Aus dem Verbrauch der Meßlösung bekannter Konzentration bis zum Umschlagspunkt bzw. Reaktionsendpunkt kann der Gehalt der Analysenlösung an bestimmten Stoffen errechnet werden. Eine große Rolle bei der quantitativen Analyse spielen die elektrochemischen Verfahren, die optischen Verfahren, die chromatographischen Verfahren und die spektralanalytischen Verfahren (s. S. 40 u. 42).



Herstellung des Sodaauszugs zum Nachweis der Anionen bei der qualitativen Analyse



Beispiel:

Einwaage 1g: Auswaage an Eisenoxid 0,8 g ≙ 0,56 g Eisen Probe enthält 56% Eisen

Bestimmung des Eisengehaltes einer Analysensubstanz durch Auswaage als Eisenoxid mit Hilfe der quantitativen Analyse

CHEMISCHE ANALYSE III

Quantitative Analyse organischer Verbindungen (Elementaranalyse): Zur quantitativen Erfassung der in einer organischen Substanz enthaltenen Elemente ist es nach der klassischen Analyse notwendig, das Molekül durch oxydative oder reduzierende Maßnahmen zu zerstören und die Anteile der einzelnen Elemente gesondert zu bestimmen.

Bestimmung des Kohlenstoffs und des Wasserstoffs: Eine kleine Menge der Analysensubstanz wird bei Temperaturen von etwa 650 bis 700° C in einem Rohr im Sauerstoffstrom verbrannt. Die entstehenden Dämpfe werden über Kupferoxide und Platinwolle, die als Katalysator zur vollständigen Verbrennung in Kohlendioxid und Wasser dienen, in zwei Absorptionsröhrchen geleitet. Das erste Röhrchen enthält getrocknetes Kaliumperchlorat und dient zur Absorption des Wassers, das zweite Röhrchen enthält fein verteiltes Natriumhydrogencarbonat und dient zur Absorption des Kohlendioxids. Durch Differenzenwägung läßt sich die Menge des absorbierten Wassers bzw. Kohlendioxids ermitteln und daraus der Gehalt der Analysensubstanz an Wasserstoff und Kohlenstoff.

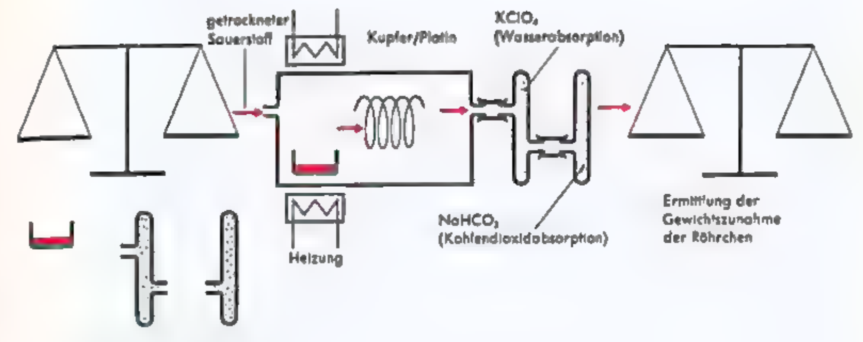
Bestimmung des Stickstoffs: Stickstoff läßt sich in ähnlicher Weise wie Kohlenstoff und Wasserstoff bestimmen, nur wird hier die Analysensubstanz gut mit Kupferoxid durchmischt und in einem Strom von Kohlendioxid erhitzt. Die Verbrennungsgase werden durch ein mit 50%iger Kalilauge gefülltes Absorptionsgefäß geleitet, das alle Verbrennungsgase mit Ausnahme des Stickstoffs absorbiert, der auf diese Weise direkt volumetrisch mit dem *Azotometer* bestimmt wird.

Bestimmung von Halogenen: Halogene werden gravimetrisch in Form der Silberhalogenide bestimmt, die sich beim Erhitzen der Analysensubstanz mit Silbernitrat und rauchender Salpetersäure bilden.

Die Bestimmung des *Sauerstoffs* erfolgt entweder rein rechnerisch durch Addieren der übrigen Bestandteile und Subtrahieren von der Gesamtmenge der Analysensubstanz oder analytisch durch Zersetzung der Substanz im Stickstoffstrom bei hohen Temperaturen, wobei sich der Sauerstoff mit dem Kohlenstoff quantitativ zu Kohlenmonoxid umsetzt, dessen Menge ermittelt wird.

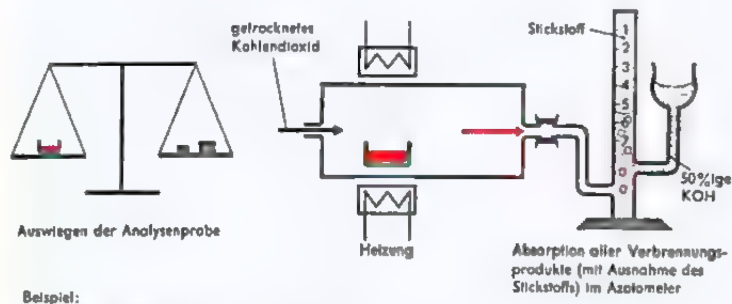
In den letzten Jahren haben vor allem diejenigen Analysenmethoden an Bedeutung gewonnen, die es gestatten, Bestandteile chemischer Verbindungen oder die Zusammensetzung von Stoffgemischen direkt, ohne Einschaltung zeitraubender und mit Fehlern behafteter Trennungsverfahren, zu ermitteln. Eine besondere Rolle spielen bei diesen Verfahren die elektrochemischen, optischen, chromatographischen und spektralanalytischen Methoden.

Elektrochemische Verfahren: Sie beruhen auf chemischen und physikalischen Vorgängen in der Lösung und an den Grenzflächen der Elektroden einer elektrolytischen Zelle. In den meisten Fällen dienen die meßbaren Ströme und die auftretenden elektrochemischen Spannungen zum Erkennen des Endpunktes von Titrationen, da in einem Elektrolyten die Elektrodenpotentiale und die spezifischen Leitfähigkeiten mehr oder weniger stark von Konzentration aller Ionen abhängen. Eines dieser elektrochemischen Verfahren ist z. B. die *Polarographie*, bei der sich die Analysenlösung zwischen zwei Quecksilberelektroden befindet und einer ständig steigenden Spannung ausgesetzt wird. Sobald das Reduktionspotential (d. h. diejenige Spannung eines Ions, bei der der Übergang in die nächst niedrigere Wertigkeitsstufe erfolgt) erreicht ist, steigt die Stromstärke sprungartig an. Nach Abschluß der Reduktion nimmt dann die Stromstärke wieder ab. Findet bei weiterer Erhöhung der Spannung eine erneute Reduktion desselben oder eines anderen Ions der Lösung statt, nimmt die Stromstärke wieder zu.



Beispiel:
Einwaage 1 g — Wassermenge 0,72 g ≙ 0,04 g Wasserstoff
Kohlendioxid 2,72 g ≙ 0,75 g Kohlenstoff
Probe enthält 4% Wasserstoff und 75% Kohlenstoff

Quantitative chem. Analyse organischer Substanzen
(Bestimmung des Kohlenstoff- und Wasserstoffgehaltes)



Beispiel:
Einwaage 1g
gebildete Stickstoffmenge 5,5 cm^3 ≙ 0,0068 g
Probe enthält 0,68% Stickstoff
Quantitative chemische Analyse organischer Substanzen
(Bestimmung des Stickstoffgehaltes)

CHEMISCHE ANALYSE IV

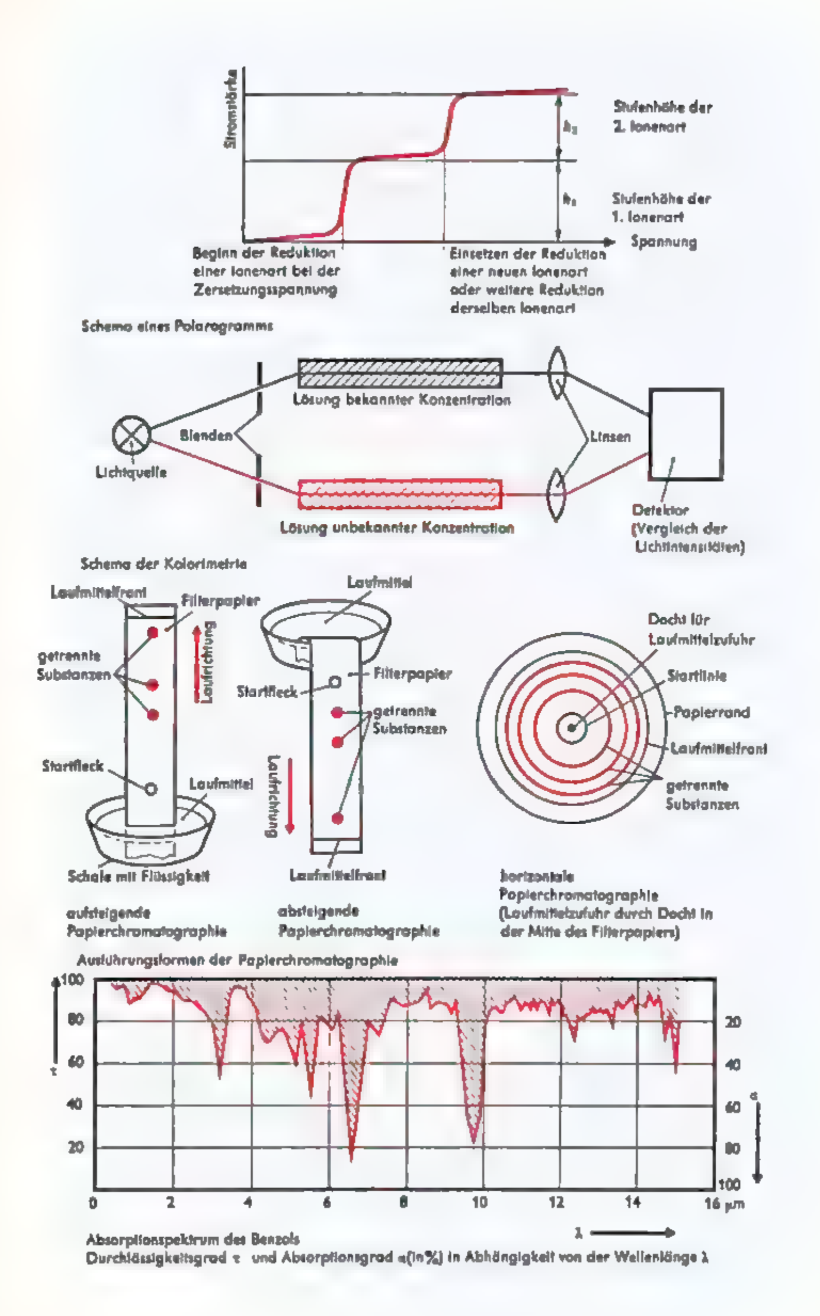
Trägt man die jeweilige Spannung in einem Diagramm gegen die jeweilige Stromstärke auf, erhält man eine treppenförmige Kurve. Sind z. B. Cu^{2+}-Ionen in der Lösung enthalten, so zeigt das Diagramm zwei solcher Treppenstufen: 1. $Cu^{2+} + e^- \rightarrow Cu^+$; 2. $Cu^+ + e^- \rightarrow Cu$. Die jeweilige Zersetzungsspannung ist für jede Ionenart, die Stufenhöhe für die Konzentration der untersuchten Ionenart charakteristisch. Die zeichnerische Darstellung von Spannung und Stromstärke nennt man *Polarogramm*, der zur Untersuchung verwendete Apparat wird als *Polarograph* bezeichnet.

Optische Verfahren: Sie beruhen auf der Auswertung der Färbung von Niederschlägen oder Lösungen mit Hilfe optischer Methoden. Ein typisches Beispiel für dieses Verfahren bietet die *Kolorimetrie*, die mit dem Vergleich von Lichtintensitäten der gleichen Farbe arbeitet. Zu diesem Zweck werden von einer Lichtquelle ausgehend zwei Lichtstrahlen jeweils durch eine Vergleichslösung bekannter Konzentration und durch die Analysenlösung gesandt. Aus der unterschiedlichen Lichtintensität, die mit Hilfe eines Detektors festgestellt wird, läßt sich die Konzentration der Analysenlösung an bestimmten Ionen errechnen.

Chromatographische Verfahren: Hier wird die Trennung eines Stoffgemisches in seine Einzelbestandteile durch die wiederholte Verteilung des Stoffgemisches in einer relativ großen Grenzschicht zwischen zwei nicht mischbaren, gegeneinander bewegten Phasen bewirkt. Die Hilfsphasen können fest, flüssig oder gasförmig sein. Die stofftrennende Bewegung einer Phase ist gerichtet, die andere Phase ruht und wird von der bewegten Phase durchspült. In dieser Wanderungsrichtung wird das Stoffgemisch getrennt, und zwar so, daß die unterschiedlichen Bestandteile unterschiedlich stark in ihrer Bewegung gehemmt (verzögert) werden. Für die Durchführung der Chromatographie stehen die unterschiedlichsten Ausführungsformen zur Verfügung, man unterscheidet Gaschromatographie, Säulenchromatographie und Papierchromatographie. Letztere läßt sich entweder als aufsteigende, absteigende oder horizontale Papierchromatographie ausführen. Ein Ende des Filterpapiers hängt dabei jeweils in das Laufmittel, das zu trennende Stoffgemisch wird auf den Startfleck geträufelt und durch das Laufmittel unterschiedlich weit transportiert. Nach Beendigung der Trennung können die getrennten Substanzen durch Ansprühen mit geeigneten Reagenzien sichtbar gemacht oder in anderer Weise identifiziert werden. Die Chromatographie zählt heute zu den wichtigsten und genauesten Analysenverfahren, sie wird v. a. bei der Auftrennung komplexer Naturstoffe eingesetzt.

Spektralanalytische Verfahren: Sie beruhen auf der Emission und Absorption sichtbarer und unsichtbarer elektromagnetischer Wellen. Die Ursachen für die Emission und Absorption sind jeweils durch Unterschiede im Atombau und in der chemischen Bindung der einzelnen Elemente begründet. Die spektralanalytischen Verfahren sind die empfindlichsten Nachweismethoden der analytischen Chemie. Je nach verwendetem Wellenbereich unterscheidet man zwischen Infrarot-, Ultraviolett-, Röntgen- und Hochfrequenzspektroskopie. Vor allem die Hochfrequenzspektroskopie mit ihren drei Teilbereichen Mikrowellen-, Kernresonanz- und Elektronenresonanzspektroskopie hat der analytischen Chemie neue, äußerst empfindliche Nachweismethoden geliefert. Die Messung der emittierten oder absorbierten Wellenlängen kann direkt oder indirekt erfolgen. Die direkte Messung beruht auf der Wellenlängenabhängigkeit der Brechungs- und Beugungserscheinungen, die indirekte Messung erfolgt durch Vergleich mit geeichten Spektren.

Mit Hilfe der spektroskopischen Methoden lassen sich auch bereits weitgehende Aussagen über die Bindungsverhältnisse der am Aufbau einer Verbindung beteiligten Elemente gewinnen, auch die Struktur organischer Verbindungen kann, v. a. mit den Methoden der Hochfrequenzspektroskopie ermittelt werden.



Schema eines Polarogramms

Schema der Kolorimetrie

aufsteigende Papierchromatographie

absteigende Papierchromatographie

horizontale Papierchromatographie (Laufmittelzufuhr durch Docht in der Mitte des Filterpapiers)

Ausführungsformen der Papierchromatographie

Absorptionsspektrum des Benzols
Durchlässigkeitsgrad τ und Absorptionsgrad α(in %) in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ

EXTRAKTION

Extraktion ist ein chemisches Grundverfahren zur Trennung zweier Stoffe. Man unterscheidet dabei grundsätzlich zwei Verfahren: 1. die Fest-flüssig-Extraktion, bei der ein flüssiges Lösungsmittel das Extraktionsgut aus einem festen Stoff herauslöst, 2. die Flüssig-flüssig-Extraktion, bei der das Extraktionsgut von einer flüssigen Phase in die andere (Lösungsmittel) übergeht. Wichtig und schwierig hierbei ist die Auswahl des geeigneten Lösungsmittels, denn in diesem soll sich das Extraktionsgut leichter lösen als im Ausgangsstoff. Das Problem wird stufenweise gelöst, d. h. einem Ausgangsstoff von bestimmter Konzentration an Extraktionsgut steht ein Lösungsmittel entweder rein oder schon mit gelöstem Extraktionsgut gegenüber. Nach genügend inniger Vermischung der Komponenten erstellt sich nach einem Verteilungsgesetz eine Endkonzentration im Lösungsmittel und im Ausgangsstoff für jede Stufe ein. Um das gesamte Extraktionsgut zu gewinnen, müssen oft viele Stufen hintereinander geschaltet werden. Das einfachste Extraktionsverfahren beruht darauf, daß man das Lösungsmittel mit dem Extraktionsgut durch Schütteln in einem Gefäß in innigen Kontakt bringt. Dabei geht die zu extrahierende Substanz in das Lösungsmittel über (eine Stufe). Bei wasserlöslichen Stoffen verwendet man Wasser als Extraktionsmittel. Fette, Öle usw. werden mittels Äther, Benzin, Benzol o. ä. extrahiert.

Eine Intensivierung des Extraktionsprozesses erreicht man im Labormaßstab im sog. Soxhlet-Extraktionsapparat (Abb. 1). Das Extraktionsgut wird hierbei durch einen ständig kreisenden Flüssigkeitsstrom ausgewaschen. Das Lösungsmittel, im Kolben verdampft, steigt in der Apparatur empor, kondensiert im Kühler und tropft auf das Extraktionsgut. Die heißen Lösungsmitteltröpfchen nehmen den Extrakt auf und transportieren ihn über ein Heberohr in den Kolben, wo sich mit der Zeit immer mehr Extrakt ansammelt. Nach einer gewissen Zeit enthält der Kolben die gesamte, ursprünglich im Extraktionsgut vorhandene Extraktmenge.

Im technischen Maßstab wird die Extraktion dadurch intensiviert, daß man eine möglichst große Kontaktfläche zwischen dem Lösungsmittel und dem Extraktionsgut schafft und möglichst viele Stufen hintereinanderschaltet. Ist der zu extrahierende Stoff seinerseits in einem Lösungsmittel enthalten, dann schickt man die „Trägerflüssigkeit" („abgebende Flüssigkeit") im Gegenstrom zum Lösungsmittel („aufnehmende Flüssigkeit") durch hohe Kolonnen (Abb. 2), die mit keramischen Füllkörpern oder Sieben ausgerüstet sind, oder man arbeitet mit sog. Extraktionsmaschinen, in denen durch rotierende Elemente der notwendige gute, wiederholte Austausch zwischen den beiden Flüssigkeiten dadurch erreicht wird, daß sie in dünne Filme ausgebreitet und diese aneinander vorbeigeführt werden (Abb. 3).

Die Extraktion ist eines der wichtigsten Verfahren der chemischen Industrie. Sie dient zur Gewinnung sehr reiner Stoffe wie Toluol, Butadien, Olefine, Schmieröle sowie zur Abtrennung von Wachs, Asphalt und Kohle von Erdöl. Ferner verwendet man das Extraktionsverfahren bei der Gewinnung von Essigsäure aus Produkten der Holzdestillation, zur Gewinnung von Phenol aus Abwässern, Produkten der Leuchtgaserzeugung u. a. Die Reinigung von Pflanzenölen und Gewinnung von Vitaminen und Antibiotika ist ebenfalls eng mit diesem Verfahren verbunden.

Schließlich macht die Extraktion eine Gewinnung von Reaktionsprodukten der chemischen Grundoperationen, der Sulfonierung und Nitrierung, technisch leicht durchführbar und rentabel. Im großtechnischen Maßstab wird die Extraktion meist in komplizierten Anlagen durchgeführt. Ein Beispiel ist die dargestellte Anlage einer Batterie-Gegenstromextraktion (Abb. 4). Das im Lösungsmittel enthaltene Extraktionsgut wird durch Eindampfen oder durch Destillation (s. S. 48) gewonnen. Gleichzeitig wird so das Lösungsmittel für den Wiedereinsatz brauchbar.

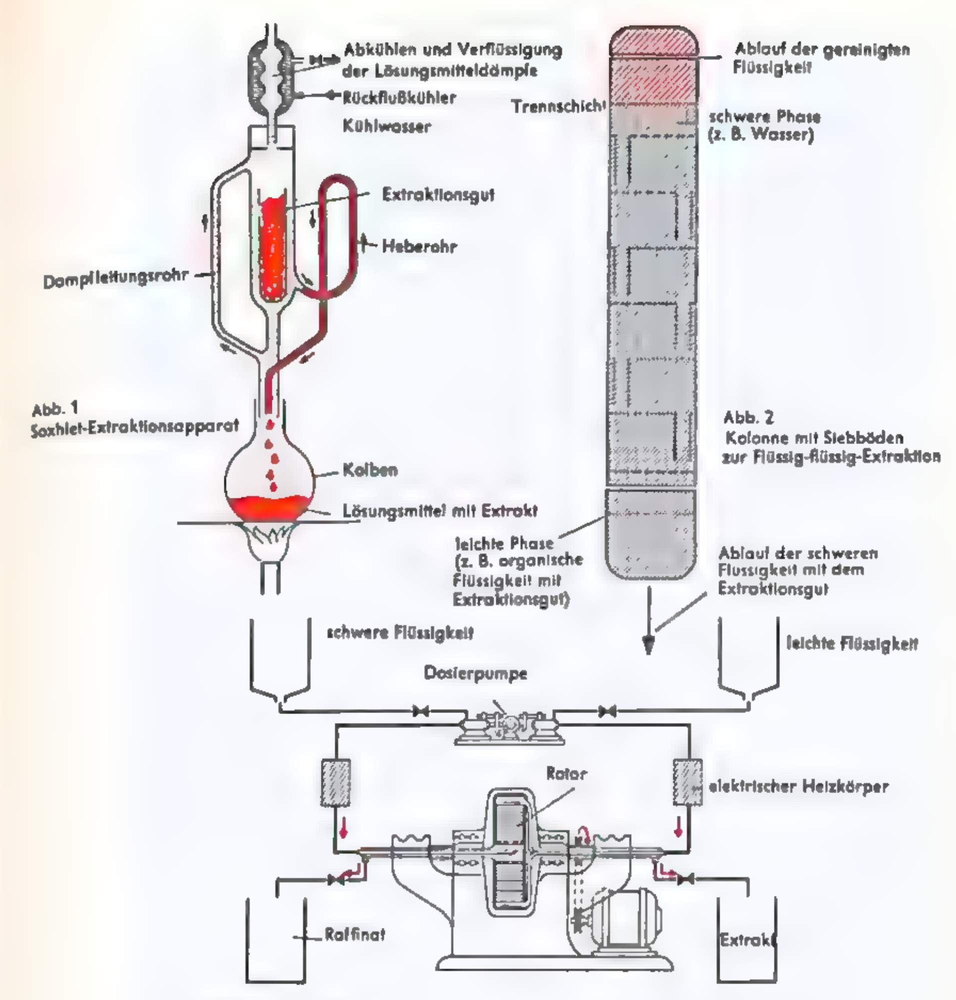


Abb. 1 Soxhlet-Extraktionsapparat

Abb. 2 Kolonne mit Siebböden zur Flüssig-flüssig-Extraktion

Abb. 3 Podbielnak-Extraktor

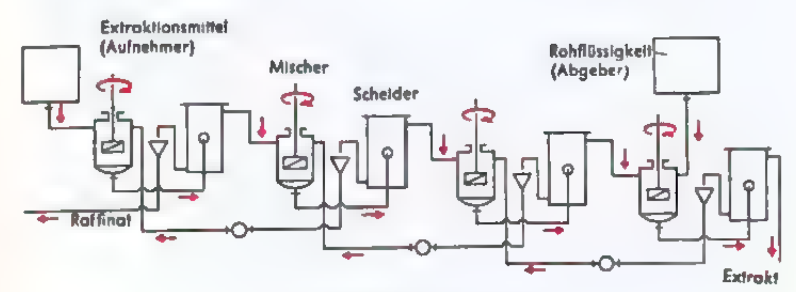


Abb. 4 Batteriegegenstromextraktion

FILTRATION

Filtration ist die Abscheidung von Feststoffteilchen aus einer Flüssigkeit mit Hilfe poröser Schichten, die die Flüssigkeit durchlassen, Feststoffteilchen jedoch zurückhalten.

Man unterscheidet drei Arten von Filtrationsverfahren:

1. Trennfiltration – zur Gewinnung des Feststoffes;
2. Klärfiltration – zur Gewinnung der klaren Flüssigkeit;
3. Kombinationsfiltration – zur Gewinnung der Flüssigkeit und des Feststoffes.

Der einfachste, bei diesen Verfahren ablaufende Prozeß ist die Oberflächenfiltration. Feststoffteilchen, deren Durchmesser größer ist als der der Poren, werden auf der Oberfläche der Filterschicht zurückgehalten – die Flüssigkeit trennt sich dort von der Feststoffkomponente. Gleichzeitig kommt es meist auch zu einer sogenannten Tiefenfiltration, die dadurch entsteht, daß Feststoffteilchen, die kleiner sind als die Poren des Filtermittels, in dessen Kapillaren eindringen und sich an den Wänden festsetzen. Dies geschieht infolge von Adsorption (Wechselwirkung zwischen Molekülen der Kapillaren und der Feststoffteilchen) oder auch durch elektrische Kräfte (Abb. 1). Wenn diese Teilchen und die Kapillaren gleichsinnig aufgeladen sind, stoßen sie sich infolge der Coulombschen Kraft ab – sind sie gegensinnig aufgeladen, kommt es zu einer Anziehung, die u. U. die Poren des Filtermittels verstopfen kann.

Entscheidend für den Filtrationsprozeß sind vor allem zwei Eigenschaften: die Größe und die Form der Feststoffteilchen. Grobe, harte Körner lassen sich z. B. wesentlich leichter filtrieren, denn sie bauen einen lockeren Filterkuchen auf, der den Flüssigkeitstransport nicht behindert. Flüssigkeiten, die jedoch sehr feine Teilchen enthalten, lassen sich schwerer filtrieren. In bezug auf die Formabhängigkeit gilt folgendes: Körnige Stoffe mit harten Kanten eignen sich besser zur Filtration als flache.

Zum Reinigen großer Flüssigkeitsmengen von relativ wenig Feststoff, insbesondere bei der Trinkwasseraufbereitung, verwendet man bevorzugt Kies- und Sandfilter. Die einfachsten Ausführungen dieser Filterart sind große offene Gruben oder Betonbehälter mit einem die Filterschicht tragenden Rost. Die Filterschicht besteht aus Lagen verschieden grober Sand- bzw. Kieskörner und hat eine Dicke bis zu 2 m. Diese Filterart ist jahrelang ohne wesentliche Wartung arbeitsfähig. Wegen der geringen Filtrationsgeschwindigkeit von 0,1 m/h haben diese „Langsamfilter" große Abmessungen, um eine entsprechende Leistung pro Zeiteinheit zu gewähren. Wegen des damit verbundenen hohen Aufwands an Fläche und Baukosten werden sie, insbesondere in der Industrie durch die wesentlich kleineren und leistungsfähigeren Schnellfilter verdrängt. Kennzeichnend für Schnellfilter ist ein Düsensystem, das im Rost angeordnet wird.

Zur Rotschlammfiltrierung in der Tonerdeindustrie, zur Aufbereitung von Schmierölen in der petrochemischen Industrie, und überall dort, wo schlammförmige, feinfaserige Stoffe aus der Trübe abgesondert werden, gelangen sogenannte Blattfilter zum Einsatz. Hier wird die Flüssigkeit unter Druck auf runde, quadratische bzw. rechteckige plattenartige Filterelemente gedrückt und das klare Filtrat vom Inneren des Apparates abgeleitet. Der Filterkuchen wird durch Abblasen von der Filterfläche getrennt. Beispiel eines Blattfilters ist das sogenannte Kelly-Filter, das bei Überdruck von 35 at und hohen Temperaturen arbeitet (Abb. 3).

Beispiel eines stetig arbeitenden Filters ist das Kapillarbandfilter (Abb. 4). Es wird dort verwendet, wo die Flüssigkeit sehr schonend aus dem Filterkuchen abgesondert werden muß – zum Beispiel bei der Gewinnung eiweißhaltiger Produkte, Hefe, Öltrub und organischer Kolloide. Ein feines, endloses Filtertuch läuft über drei sehr saugfähige Filze, die dem Filtergut die Flüssigkeit entnehmen.

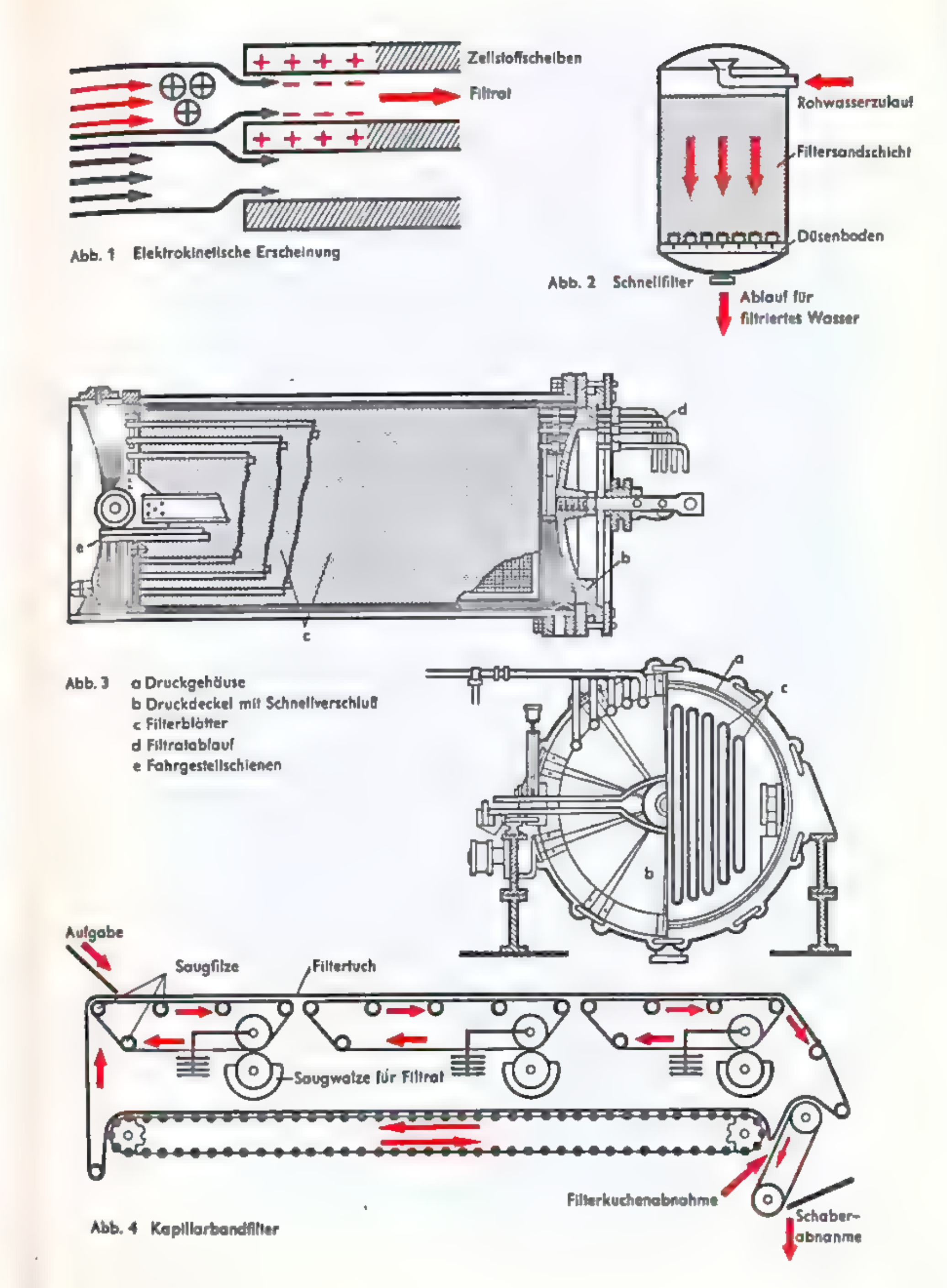


Abb. 1 Elektrokinetische Erscheinung

Abb. 2 Schnellfilter

Abb. 3 a Druckgehäuse
b Druckdeckel mit Schnellverschluß
c Filterblätter
d Filtratablauf
e Fahrgestellschienen

Abb. 4 Kapillarbandfilter

DESTILLATION

Wenn eine Flüssigkeit erhitzt wird, beginnen die Flüssigkeitsmoleküle eine immer heftigere Bewegung auszuführen; sie stoßen dabei andere, noch nicht stark bewegte Moleküle, bis schließlich einige Flüssigkeitsmoleküle so schnell bewegt werden, daß sie die Oberflächenhaut der Flüssigkeit durchstoßen (Abb. 1). Sie sind damit frei beweglich geworden und entweichen als Gas. Bei Zusammenstößen mit den Molekülen eines kälteren Mediums geben sie wieder einen Teil ihrer Bewegungsenergie ab, sie lagern sich aneinander und bilden schließlich wieder kleine Tropfen. Diesen Vorgang beobachtet die Hausfrau z.B. beim Kochen von Wasser, dessen wieder abgekühlter Dampf am Küchenfenster zur Flüssigkeit kondensiert. Das von der Sonnenwärme verdampfte Wasser kondensiert bei der Abkühlung in großen Höhen ebenfalls wieder zu kleinsten Tröpfchen (Wolken), die schließlich als größer gewordene Tropfen wieder zur Flüssigkeit zusammenlaufen, wenn es regnet. Die technische Chemie schließt diesen Vorgang in kleinere oder größere Apparate, sog. Destilliergeräte (Abb. 2) oder Destillationskolonnen (Abb. 3) ein und trennt durch Destillation verdampfende von nicht verdampfenden Stoffen oder weniger leicht verdampfende von leichter verdampfenden Stoffen. Destillation ist demnach ein Verfahren zur Trennung von Stoffen nach ihrem Flüchtigkeitsgrad. Der beim Erhitzen verdampfende und durch Abkühlung in Kühlern wieder kondensierte Anteil heißt Destillat; der nicht verdampfende Anteil wird Destillationsrückstand genannt. Die Destillation ist eines der wichtigsten Verfahren zur Reinigung flüchtiger Stoffe, sie wird schon seit über tausend Jahren betrieben. Die Hochleistungstrennkolonnen der technischen Chemie sind bis zu 100 m hoch, bis zu 5 m dick und werden besonders in der Erdölindustrie zur Gewinnung von Treibgasen, Kraftstoffen, Schmierölen usw. in großem Umfang eingesetzt; aber auch die Gewinnung von Alkohol ist ohne Destillation undenkbar.

Allerdings können durch Destillation nur Stoffe voneinander getrennt werden, die wenigstens eine Siededifferenz von 0,5–1 °C aufweisen, wenn nicht Hilfsstoffe (Extraktivdestillation) in Sonderfällen Erleichterungen schaffen. Nach dem Raoultschen Gesetz entsendet auch der höhersiedende Stoff eine seinem Anteil und Dampfdruck entsprechende Menge in den Dampf des niedersiedenden Stoffes, so daß dieser immer mehr oder weniger mit dem höhersiedenden Stoff verunreinigt ist. Durch die Rückführung eines Destillatteils des niedersiedenden Stoffes in den Kopf der Kolonne wird jedoch z. B. in Rektifizieranlagen (Abb. 3) die Trennung verbessert.

Jede Destillieranlage besteht aus der Wärmequelle und dem Verdampfer (Durchlauferhitzer, Blase, Destillierkolben, Retorte). Für Trennungen flüchtiger Gemische ist eine Fraktioniereinheit an den Verdampfer angeschlossen, so daß sich das Destillationsgleichgewicht entsprechend der qualitativen und quantitativen Zusammensetzungen des Gemisches und der Zustandsgrößen Temperatur bzw. Druck einstellt. Schließlich wird in einem Kühler das Destillat abgekühlt und entweder vollständig oder nur teilweise abgenommen. Bei schwierigen Trennungen läuft je nach Problem und Trennleistung der Kolonne ein mehr oder weniger großer Teil des Destillats in die Kolonne zurück. Man unterscheidet Einweg-, Vakuum-, Kurzweg-, Druck-, fraktionierte und trockene Destillation. Bei letzterer wird ein an sich nicht flüchtiger Stoff wie z. B. Holz erst durch Hitze in destillierbare Anteile gespalten.

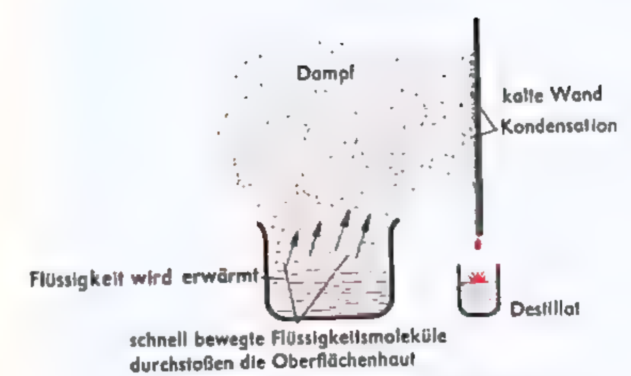


Abb. 1 Vorgänge bei der Destillation

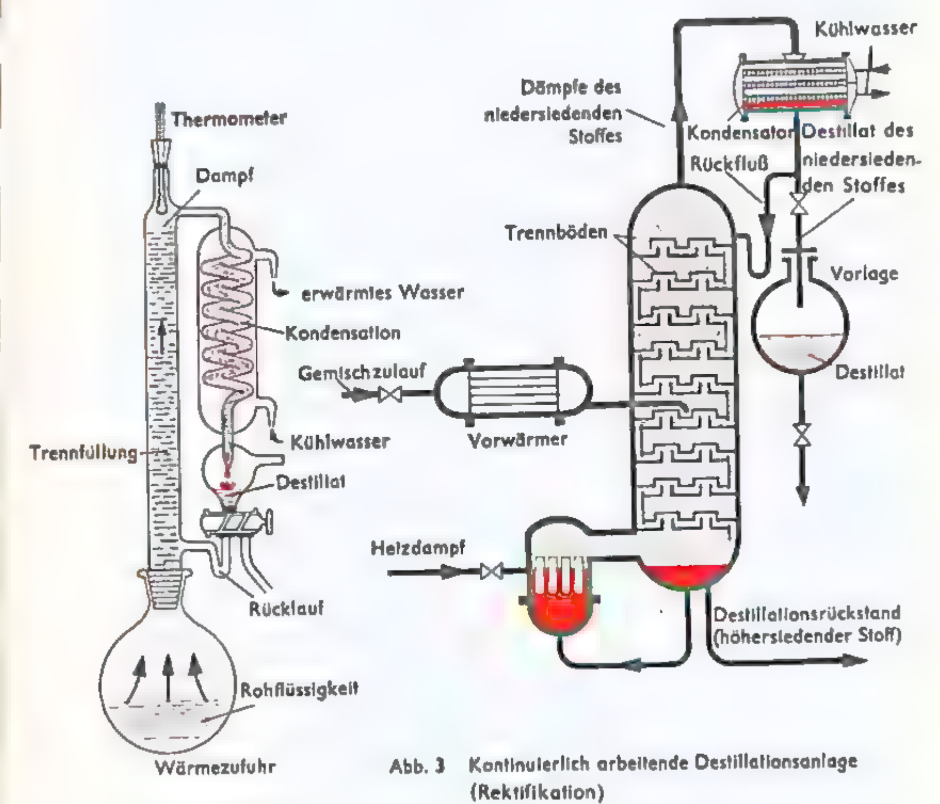
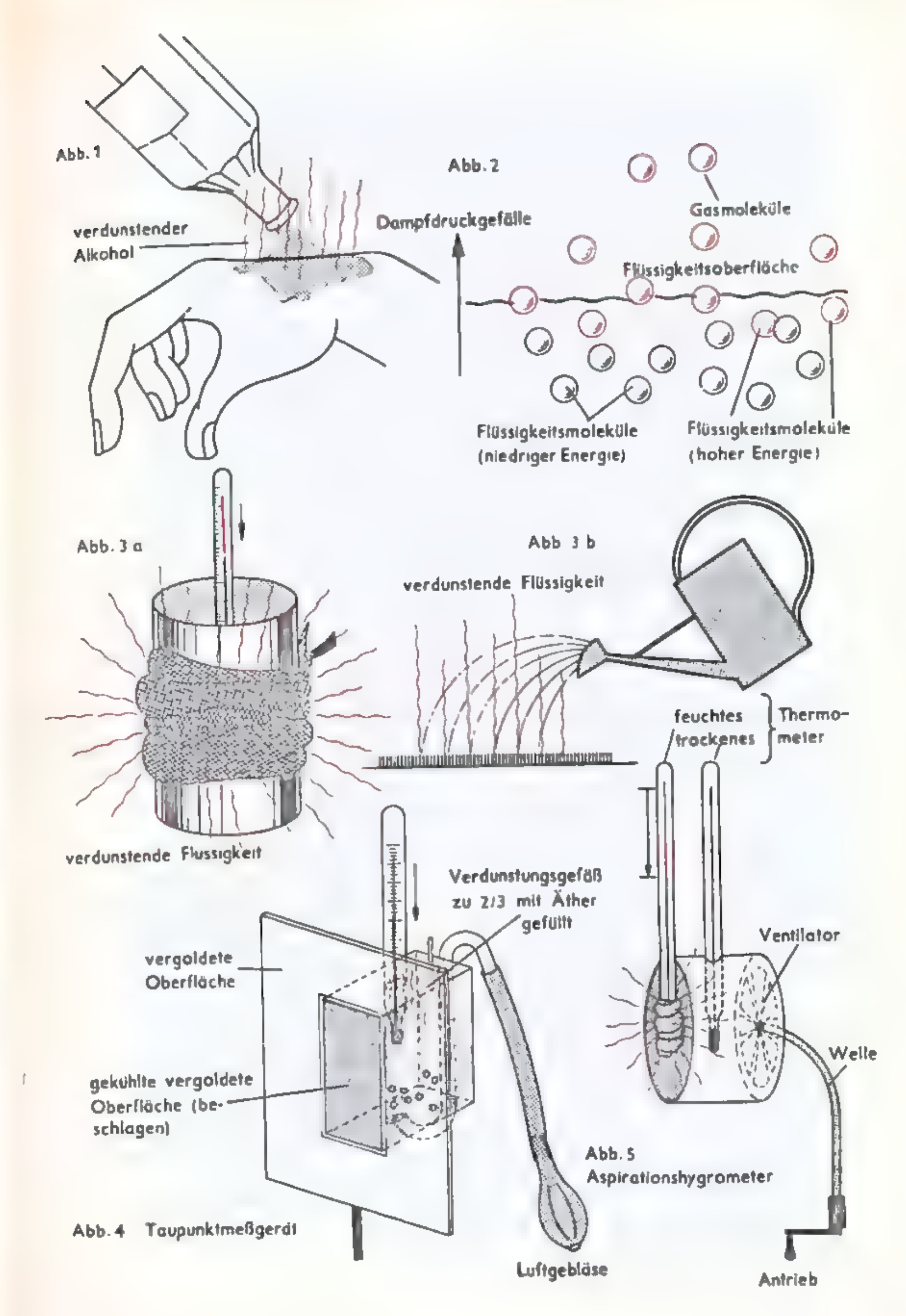


Abb. 2 Moderner Destillierapparat

Abb. 3 Kontinuierlich arbeitende Destillationsanlage (Rektifikation)

VERDUNSTUNG, VERDUNSTUNGSKÜHLE

Gießt man sich eine handwarme Flüssigkeit, z. B. Alkohol, über die Hand (Abb. 1), so wird nach einiger Zeit im allgemeinen ein starkes Kälteempfinden ausgelöst. Es kommt dadurch zustande, daß die Flüssigkeit verdunstet, d. h., daß die Substanz in den gasförmigen Zustand übergeht. Die Energie, die erforderlich ist, um die Moleküle aus dem losen Verband des flüssigen Zustandes zu befreien, wird dabei in Gestalt von Wärmeenergie der Umgebung (im Falle der Abb. 1 der menschlichen Hand) entzogen. Im einzelnen hat man sich den Vorgang der Verdunstung und der damit verbundenen Abkühlung so vorzustellen, wie es Abb. 2 zeigt. Dort sind die Moleküle, welche infolge der Zusammenstöße aufgrund ihrer thermischen, ungeregelten Bewegung so hohe Bewegungsenergien gewonnen haben, daß sie in der Lage sind, die Flüssigkeitsoberfläche zu durchstoßen, rot gekennzeichnet. Sie bilden im Raum über der Flüssigkeitsoberfläche den gasförmigen Zustand der verdunstenden Substanz. Schwarz hingegen sind die Moleküle niedrigerer Energie gezeichnet, welche den flüssigen Zustand bilden. Es ist einleuchtend, daß durch die Abwanderung der Moleküle höherer Energie infolge Verdunstung der durchschnittliche (mittlere) Energiewert der Moleküle des flüssigen Zustandes sinkt. Diesem mittleren Energiewert ist aber eine Größe proportional, die als Maß für unser Wärme- bzw. Kälteempfinden allgemein bekannt ist, die *Temperatur*. Absinken der mittleren Energie bedeutet mithin Sinken der Temperatur und damit Abkühlung. Die Verdunstung findet so lange statt, bis der Dampf-(Gas-)Druck der verdunsteten Substanz im Außenraum bewirkt, daß ebenso viele Moleküle unter Wärmeabgabe in die Flüssigkeit zurückkommen (kondensieren) wie unter Wärmeaufnahme verdunsten (Gleichgewichtszustand). Wir spüren dies sehr deutlich im Wärmehaushalt unseres Körpers, der durch Wasserabsonderung (Schweiß) und Verdunstung im Wärmegleichgewicht gehalten wird. Ist der Wasserdampfdruck, d. h. die Luftfeuchtigkeit, sehr hoch, so wird diese Regulation gestört und wir empfinden die Umgebung als schwül. Man ahmt diesen biophysikalischen Regelvorgang nach, wenn man z. B. ein Gefäß mit Inhalt (Abb. 3 a) durch Umwickeln mit einem feuchten Tuch abkühlt. Auch die „Vereisung" durch Chloräthyl zur Schmerzunempfindlichmachung bei kleinen operativen Eingriffen ist hier anzuführen. Der Kühleffekt, der sich beim Besprengen von Straßen- und Gartenflächen ergibt, beruht gleichfalls auf der Verdunstung des großflächig ausgebreiteten Wassers (Abb. 3 b). Meßtechnisch wird die Abkühlung durch Verdunstung im Taupunktmesser (Abb. 4) und im Aspirationshygrometer (Abb. 5) zur Bestimmung der Luftfeuchtigkeit eingesetzt. Beim Taupunktmesser wird eine polierte, vergoldete Metallfläche durch Verdunstung von Äther abgekühlt und die Temperatur (Taupunkt) bestimmt, bei der sich der erste Anflug eines Feuchtigkeitsbeschlages zeigt. Um die Abkühlung zu beschleunigen, bläst man Luft durch den Äther. Je größer die Luftfeuchtigkeit ist, desto höher liegt die Taupunkttemperatur. Beim Aspirationshygrometer werden ein trockenes und ein „feuchtes" (mit feuchtem Stoff am unteren Ende umwickeltes) Thermometer dem gleichen Luftstrom ausgesetzt. Je höher die Luftfeuchtigkeit ist, desto weniger Wasser verdunstet am feuchten Thermometer und desto weniger sinkt dessen Temperatur gegenüber der Temperatur des trockenen Thermometers.



WÄRMESTRAHLUNG

Der von uns als Wärme empfundene Zustand eines Körpers, dessen graduelle Abstufung wir als Temperatur messen, wird durch die Bewegung seiner Bausteine, der Atome bzw. Moleküle, hervorgerufen. Diese schwingen bei einem festen und bei einem flüssigen Körper völlig ungeordnet um feste bzw. bewegliche Ruhelagen, bei einem gasförmigen Körper schwingen sie sogar ganz regellos durcheinander. Bei diesen thermischen Bewegungsvorgängen, die sich über einen weiten Energiebereich erstrecken — wobei die mittlere Energie um so größer ist, je höher die Temperatur ist —, finden laufend Zusammenstöße statt, bei denen auch Veränderungen in der Elektronenhülle, die den Atomkern eines Atoms umgibt, auftreten. In Abb. 1a ist ein Atom mit Kern und Elektronenhülle schematisch dargestellt. Außerhalb der Elektronenhülle sind gestrichelt noch Zustandsbereiche (Bahnen) von Elektronen angegeben, in die Elektronen aus der Hülle durch äußere Ereignisse angehoben werden können. Solche äußeren Ereignisse sind z. B. die thermischen Zusammenstöße (Abb. 1b). Durch sie kann ein Elektron in eine äußere Bahn befördert werden. Man nennt ein solches Atom (bzw. Molekül) thermisch angeregt. Auf dieser Bahn verharrt das Elektron jedoch nicht für immer, weil der angeregte Zustand nicht stabil ist. Es strebt daher durch meistens stufenweise sich vollziehenden Fall über die benachbarten Zustände wieder seinem ursprünglichen Platz in der Elektronenhülle zu — etwa in der Weise, in der ein Ball eine Treppe herunterrollt. Die Energiedifferenz zwischen den Stufen ist dabei gering. Bei diesen Übergängen strahlt das Atom nach der Bohrschen Atomtheorie eine elektromagnetische Strahlung aus, deren Wellenlänge um so größer ist, je kleiner die Energiestufe zwischen den benachbarten Zuständen (Bahnen) ist (Abb. 1c). Wir empfinden eine solche langwellige Strahlung als Wärmestrahlung. Sie schließt sich im Spektrum an das rote Licht an, man bezeichnet sie daher als Infra- oder Ultrarotstrahlung (ihre Wellenlänge liegt oberhalb von 0,8 µm). Ein vollständiges Spektrum einer solchen Strahlung liefert uns ein sogenannter „schwarzer Strahler“ (Abb. 2). Es ist dies ein Hohlraum, in dessen einer Stirnfläche sich eine kleine Öffnung befindet. Der gesamte Strahler wird auf eine konstante Temperatur gebracht. Dann stellt sich im Inneren ein dieser Temperatur entsprechendes (Wärme-)Strahlungsgleichgewicht ein. Ein Teil dieser Strahlung entweicht durch die Öffnung und wird so der Beobachtung zugänglich. Umgekehrt verschluckt (absorbiert) der Hohlraum auch alle von außen durch die Öffnung eindringende Strahlung; er erscheint daher schwarz.

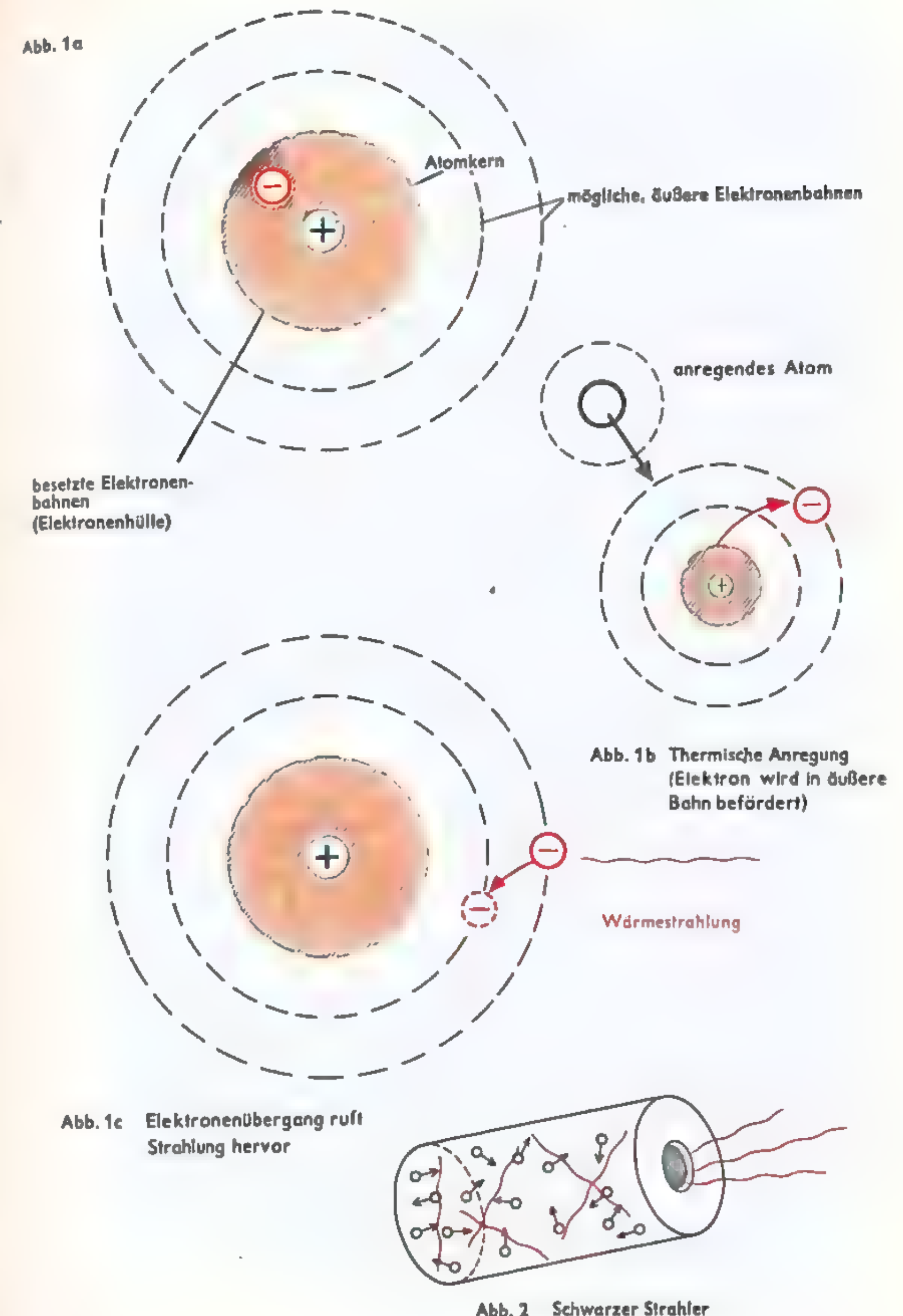


Abb. 1b Thermische Anregung (Elektron wird in äußere Bahn befördert)

Abb. 1c Elektronenübergang ruft Strahlung hervor

Abb. 2 Schwarzer Strahler

RADIOAKTIVITÄT

Unter radioaktivem Zerfall versteht man die natürliche Umwandlung von Elementen, wie sie zuerst am stufenweisen Zerfall von Radium zu Blei beobachtet wurde. Er geht unter Aussendung einer energiereichen Strahlung vor sich (Radioaktivität), die sich unter dem Einfluß eines Magnetfeldes in drei Komponenten, die α-Strahlung, β- und γ-Strahlung, aufspalten läßt (Abb. 1). Die α-Strahlung besteht aus doppelt positiv geladenen Kernen des Edelgases Helium (α-Teilchen), die β-Strahlung wird von negativ geladenen Elektronen gebildet; beide Strahlungen werden vom Magnetfeld nach verschiedenen Seiten abgelenkt. Die γ-Strahlung hingegen bleibt vom Magnetfeld unbeeinflußt, sie stellt eine elektromagnetische Wellenstrahlung extrem kleiner Wellenlänge ($\sim 10^{-12}$ cm) dar. Wegen ihrer hohen Energie sind alle drei Strahlungsarten in der Lage, eine photographische Platte zu schwärzen bzw. Gase zu ionisieren; sie lassen sich also mittels photographischer oder elektrischer Meßmethoden nachweisen. Ermittelt man die Energie der α-Teilchen in einem bestimmten Abstand vom Atomkern, so stellt man fest, daß sich letztere in einem Energieminimum innerhalb des Atomkernes im stabilen Gleichgewicht befinden, vergleichbar den Kugeln des Murmelspiels im Zielloch oder den Erbsen im Kochtopf.

Nach G. Gamow stellt man sich den radioaktiven Zerfall folgendermaßen vor: Man schematisiert einen radioaktiven Atomkern durch ein topfartiges Gebilde (Abb. 2). In diesem Topf befinden sich als Bausteine des Atomkernes α-Teilchen. Normalerweise können diese nur dadurch aus dem Topf heraus, daß sie über seinen Rand fliegen. Die α-Teilchen besitzen aber überdies Welleneigenschaften, die es ihnen (in beschränkter Zahl) ermöglichen, die Topfwandung zu durchdringen. Solche Teilchen bilden die α-Strahlung. Entsprechend erklärt sich das Auftreten der β-Strahlung, während die γ-Strahlung mit Energiezustandsänderungen innerhalb des Atomkerns in Verbindung mit den ersten beiden Strahlungsarten verknüpft ist. In Abb. 3 ist eine Apparatur zum Nachweis von α-Strahlen wiedergegeben, die nach ihren Erfindern als Geiger-Müllersches Zählrohr bezeichnet wird (Geigerzähler). Sie beruht auf dem elektrischen Nachweis der radioaktiven Strahlung durch Ionisation. Das Rohr ist mit einem verdünnten Gas gefüllt, in dem durch die radioaktive Strahlung ein Stoßionisationsprozeß eingeleitet wird, der zu einem kurzen Spannungsimpuls am Vorschaltwiderstand führt. Der Impuls wird verstärkt und dann der Zählvorrichtung zugeführt. Die hohe Empfindlichkeit des Zählrohres beruht auf der geometrischen Gestaltung seiner Elektroden. Die dünne, drahtförmige Anode (Pluspol) wird von einer großflächigen, zylindrischen Kathode (Minuspol) konzentrisch umgeben. Die Wahrscheinlichkeit, daß die beim Stoßionisationsvorgang freiwerdenden (negativen) Elektronen sofort zur Anode gelangen, ist gering. Sie fliegen in der Regel zunächst an ihr vorbei und werden durch das starke elektrische Feld der sich an der Anode zusammendrängenden Feldlinien auf eine Spiralbahn gezwungen, auf der sie noch zahlreiche Stoßionisationsvorgänge auslösen, ehe sie schließlich zur Anode gelangen. Die sehr harte, d. h. durchdringende γ-Strahlung dient in der Röntgenmedizin hauptsächlich Zwecken der Therapie.

Neben der natürlichen Radioaktivität kennt man seit 1934 auch eine künstliche Radioaktivität, d. h. Elemente, die auf dem Wege der künstlichen Atomumwandlung radioaktiv gemacht worden sind. Sie ergeben sich in der modernen Kerntechnik als Abfallprodukte beim Reaktorbetrieb (vgl. S. 60). Alle radioaktiven Erscheinungen klingen in einer bestimmten Zeit ab. Als Maß dafür hat man die Halbwertszeit eingeführt. Dies ist die Zeitspanne, nach der die Hälfte der zu Beginn der jeweiligen Zeitmessung vorhandenen radioaktiven Atome zerfallen ist. Bei den radioaktiven Spaltprodukten, die bei der Explosion von Kernwaffen entstehen, finden sich hauptsächlich Halbwertszeiten von 10–60 Tagen, daneben aber auch solche von 28 und 30 Jahren (Strontium 90 und Cäsium 137).

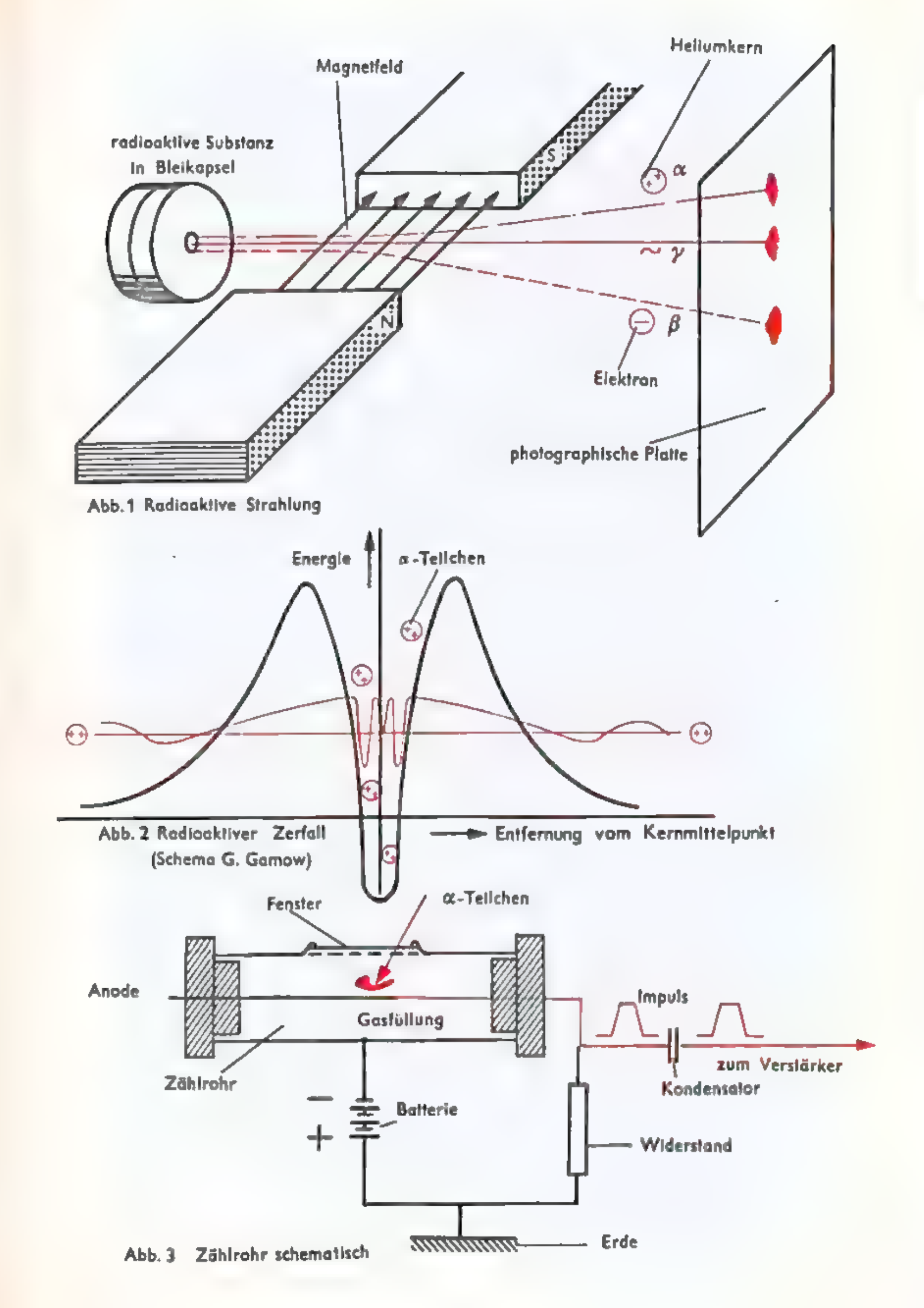


Abb. 1 Radioaktive Strahlung

Abb. 2 Radioaktiver Zerfall (Schema G. Gamow)

Abb. 3 Zählrohr schematisch

ATOMKERNE, KERNENERGIE, KERNSPALTUNG, KERNKETTENREAKTION I

Bekanntlich bestehen die in den Zentren der Atome eines Stoffes befindlichen *Atomkerne*, in denen fast die ganze Masse des Atoms vereinigt ist, obgleich ihr Durchmesser nur einige 10^{-13} cm beträgt, also 100 000 mal kleiner ist als der Atomdurchmesser selbst (einige 10^{-8} cm), sämtlich nur aus Protonen und Neutronen. Als *Protonen* bezeichnet man die positiv elektrisch geladenen Atomkerne des leichten Wasserstoffs (^{1}H), als *Neutronen* nur wenig schwerere Elementarteilchen ohne elektrische Ladung. Zwischen diesen Kernbausteinen, den *Nukleonen*, wirken auf Entfernungen von weniger als 10^{-13} cm sehr starke Anziehungskräfte, die sogenannten *Kernkräfte*, die sie im Kern zusammenhalten (binden). Die Zahl der Protonen legt dabei die Ordnungszahl Z des zugehörigen Elementes fest ($Z = 1$ beim Wasserstoff, $Z = 92$ beim Uran), während die Neutronenzahl N mit zwei Ausnahmen mindestens gleich der Protonenzahl ist ($N = 1$ beim schweren Wasserstoff, ^{2}H, und $N = 136$ beim Uranisotop ^{238}U). Die Neutronenzahl ist außerdem in den meisten Fällen nicht bei allen Atomen eines chemischen Elementes gleich; die sich in N und damit in der Massenzahl $A = Z + N$ unterscheidenden Atomsorten eines Elementes bilden die sogenannten *Isotope* dieses Elementes. Weiter zeigt sich bei mittelschweren und schweren Kernen, daß die Neutronenzahl immer stärker die Protonenzahl überwiegen muß, da sonst die Kernkräfte nicht in der Lage sind, gegen die Wirkung der elektrostatischen Abstoßungskräfte zwischen den geladenen Protonen eine Bindung der Nukleonen zu einem für alle Zeiten stabilen Atomkern zu bewirken. Bei einem ungünstigen N/Z-Verhältnis sowie bei sehr schweren Kernen ($N/Z \approx 1{,}6$) sind aus diesen Gründen die Kerne *instabil:* Sie zerfallen mit der Zeit unter Ausstoßung von Teilchen, nämlich entweder Elektronen (den Betateilchen) oder Heliumkerne (den Alphateilchen); sie sind *radioaktiv*, wie man sagt.

Bei den Atomkernen des Uranisotops ^{235}U (die Massenzahl A des jeweiligen Isotops wird am chemischen Symbol entweder links oben oder dahinter gesetzt) kann nun auf folgende Art eine sogenannte *Kernspaltung* eintreten: Ein freies Neutron geringer kinetischer Energie ($\approx 0{,}025$ eV) trifft auf einen U-235-Kern und wird von diesem eingefangen (absorbiert). Der entstehende U-236-Kern ist dann aber so instabil, daß er sich nach kurzer Zeit von selbst in zwei ungefähr gleichschwere Bruchstücke (z. B. in einen Barium- und einen Kryptonkern) spaltet, wobei außerdem mehrere Neutronen frei werden. Die als *Spaltprodukte* bezeichneten Kernbruchstücke dieser Kernspaltung fliegen mit sehr großer Geschwindigkeit fort und übertragen ihre kinetische Energie durch Zusammenstöße mit den Atomen der umgebenden Materie auf diese, wodurch der Wärmeinhalt und damit die Temperatur der Umgebung erhöht wird. Die kinetische Energie der beiden Spaltprodukte (im Mittel zusammen 170 MeV), die wegen ihres hohen Neutronenüberschusses ($N-Z$) meist radioaktiv sind, sowie die kinetische Energie der Neutronen stammt nun aus der Bindungsenergie der 235 Nukleonen des U-235-Kerns, die zum Teil bei einer solchen Kernspaltung frei wird. Die *Bindungsenergie* eines Atomkerns ist dabei diejenige Energiemenge, die man aufbringen muß, um den Kern völlig in seine Bestandteile, d. h. in einzelne Nukleonen, zu zerlegen. Sie beträgt bei Deuteriumkernen 2,2 MeV, bei Heliumkernen 28 MeV, bei Urankernen etwa 1800 MeV. Unter *Kernenergie* versteht man entweder diese Bindungsenergie oder die bei Kernspaltungen oder anderen Kernreaktionen frei werdende bzw. nutzbar gemachte Energie (meist bezogen auf die Masseneinheit). Gegenüber den Energien, die z. B. bei chemischen Vorgängen, bei Ionisation und Anregung von Atomen in der Elektronenhülle eines Atoms umgesetzt wird (es handelt sich hier höchstens um einige Elektronenvolt [eV]), sind die Kernenergien millionenfach höher.

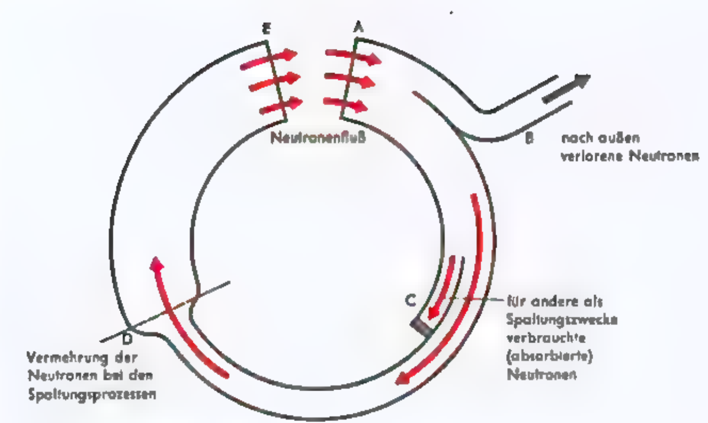


Abb. 1
Schema einer ausgeglichenen Neutronenbilanz



Abb. 2
Schwingungen eines inkompressiblen Flüssigkeitstropfens; schwere Kerne wie Uran sind bereits im Grundzustand deformiert (Fig. b); beim Zerreißpunkt (e) trennt sich der Tropfen in zwei Teile

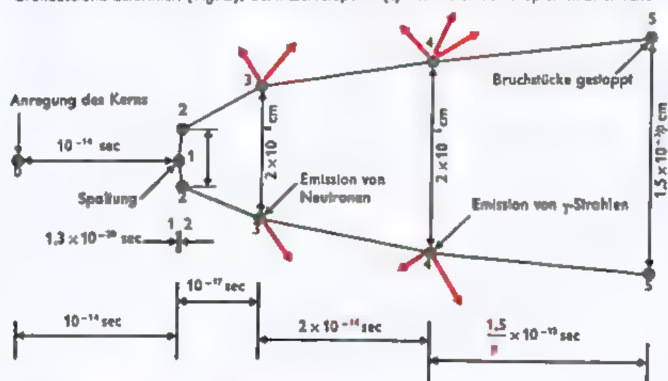


Abb. 3
Graphische Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Spaltprozesses; die Ereignisse sind: 0 Anregung des Kerns, 1 Spaltung, 2 Bruchstücke bekommen 90% ihrer kinetischen Energie, 3 Emission von Neutronen, 4 Emission von γ-Strahlung, 5 Bruchstücke gestoppt

ATOMKERNE, KERNENERGIE, KERNSPALTUNG, KERNKETTENREAKTION II

Bei jeder Kernspaltung durch langsame Neutronen werden durchschnittlich zwei oder drei Neutronen frei, d. h. mehr, als für die Kernspaltung selbst verbraucht wurden. Diese Neutronen, die ebenfalls mit großer Geschwindigkeit den sich spaltenden Kern verlassen, können ihrerseits für weitere Kernspaltungen nutzbar gemacht werden, wenn sie vorher durch genügend viele Zusammenstöße mit leichten Atomen (wie sie z. B. im Wasser und im Graphit vorhanden sind) abgebremst werden und ihre ganze kinetische Energie (bis 2 MeV) abgeben, bis sie nur noch die thermische Energie (etwa 0,025 eV) ihrer Umgebung besitzen. Die so abgebremsten Neutronen können dann viel länger mit den ^{235}U-Kernen in Wechselwirkung treten. Die Wahrscheinlichkeit für ihren Einfang und damit für eine Kernspaltung ist gegenüber schnellen Neutronen wesentlich höher.

Dadurch, daß bei jeder Spaltung mehr Neutronen entstehen als verbraucht werden, nimmt die Zahl der Kernspaltungen unter bestimmten Bedingungen sehr rasch zu: Es kommt eine als *Kernkettenreaktion* bezeichnete Folge von Kernspaltung zustande, von der ein Teilschritt in Abb. 3 veranschaulicht wird. Derartige Kernkettenreaktionen laufen in Kernreaktoren gesteuert, in Atombombenexplosionen ungesteuert ab und setzen Kernenergie in großen Beträgen frei. Bedingung für eine solche Kettenreaktion ist, daß die durch langsame Neutronen spaltbaren Atomkerne in genügender Menge in einem Material enthalten sind, so daß von den bei jeder Kernspaltung entstehenden Neutronen hinreichend viele zu weiteren Kernspaltungen führen und die Reaktion, einmal in Gang gesetzt, von selbst weiterläuft, bis alle spaltbaren Kerne aufgebraucht sind. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn in einem derartigen, als *Kernbrennstoff* oder *Spaltstoff* bezeichneten Material nicht zu viele Neutronen entweder von Atomkernen mit verschwindender Spaltungswahrscheinlichkeit weggefangen werden oder durch die Oberfläche der Kernbrennstoffmenge (die deshalb eine als *kritische Masse* bezeichnete Mindestgröße haben muß) entweichen. Außerdem müssen die Neutronen eine für die Kernspaltung günstigste, im thermischen Energiebereich liegende kinetische Energie haben, also sogenannte *thermische Neutronen* sein. Dies wird in Kernreaktoren mit Hilfe von gewissen Bremssubstanzen, den *Moderatoren*, erreicht (z. B. mit Wasser oder Graphit).

Bei einer gesteuerten Kettenreaktion in Kernreaktoren werden durch sogenannte *Absorbermaterialien* (z. B. Bor und Cadmium), deren Atomkerne stark Neutronen einfangen, aus dem ablaufenden Prozeß so viele Neutronen herausgefangen, daß er sich bei einer bestimmten Reaktionsrate stabilisiert, d. h. nicht explosionsartig abläuft. Eine Kernkettenreaktion erhält man zur Zeit nur mit dem Uranisotop U 235, mit dem Plutoniumisotop Pu 239, das z. B. in sogenannten Brutreaktoren (Brütern) mit Hilfe einer Kernkettenreaktion von U 235 in einer größeren Menge von U 238 aus diesem gewonnen wird, oder mit dem in ähnlicher Weise gewonnenen Uranisotop U 233.

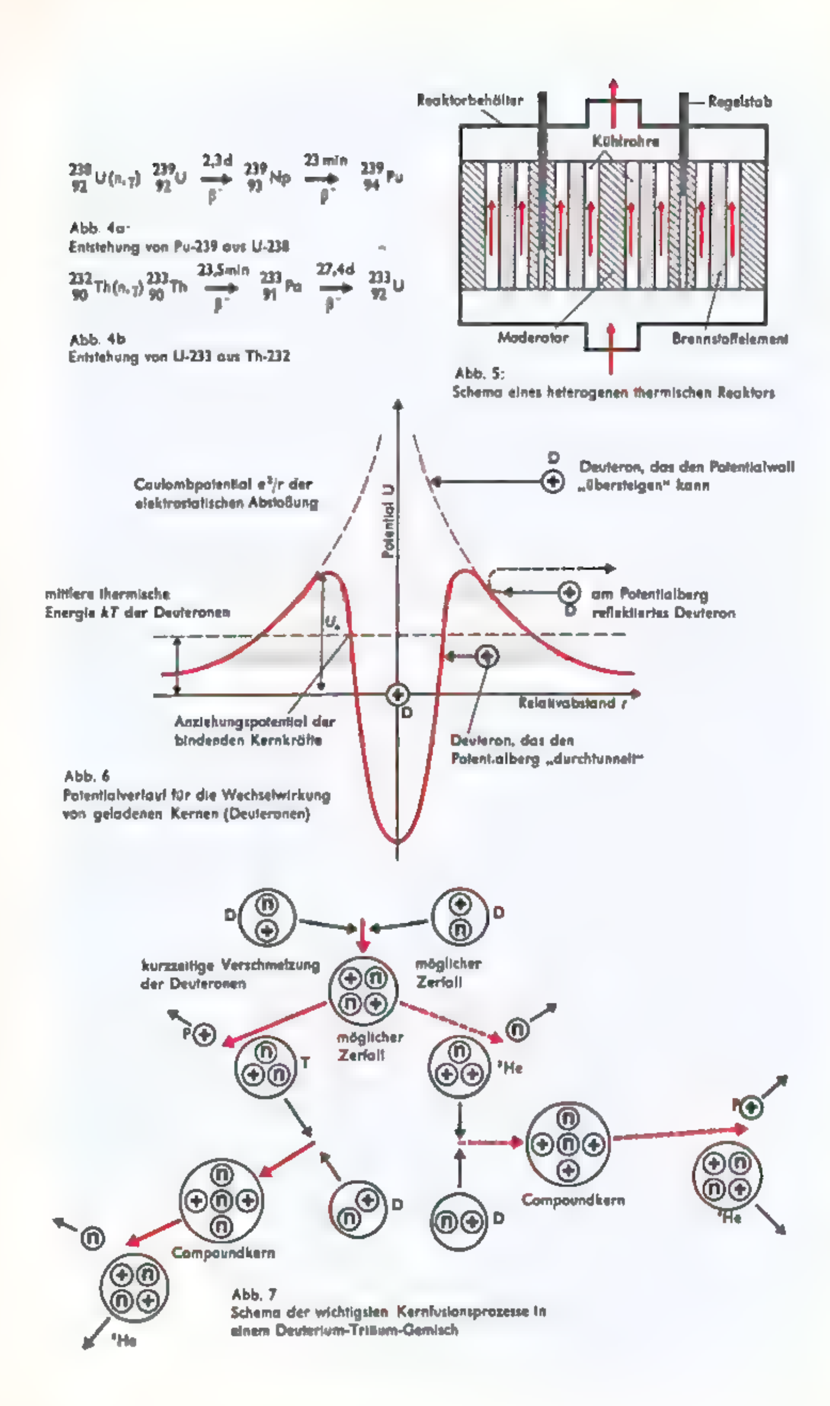


Abb. 4a
Entstehung von Pu-239 aus U-238

Abb. 4b
Entstehung von U-233 aus Th-232

Abb. 5:
Schema eines heterogenen thermischen Reaktors

Abb. 6
Potentialverlauf für die Wechselwirkung von geladenen Kernen (Deuteronen)

Abb. 7
Schema der wichtigsten Kernfusionsprozesse in einem Deuterium-Tritium-Gemisch

KERNREAKTOR I (GRUNDLAGEN)

Als *Kern-* oder *Atomreaktor* bezeichnet man eine Anlage, in der eine geregelte Kettenreaktion von Kernspaltungen zur Freisetzung von Kernenergie genutzt und diese Energie in Wärmeenergie bzw. in elektrische Energie umgewandelt wird. Gleichzeitig dient ein Reaktor zur Erzeugung von Radioisotopen (Radionukliden), also von radioaktiv zerfallenden Isotopen verschiedener chemischer Elemente. Die ersten in der Welt gebauten Kernreaktoren waren sogenannte *thermische Reaktoren*, bei denen die Kernspaltung fast ausschließlich durch Neutronen thermischer Energie bewirkt wurde. Die im Kernbrennstoff durch Kernspaltungen entstehenden Neutronen fliegen aber, ebenso wie die Spaltprodukte, mit großer Geschwindigkeit davon. Um sie auf thermische Energien (etwa 0,025 eV) zu bringen, müssen die Neutronen, die sich als elektrisch neutrale Teilchen in der Materie weitgehend ungehindert bewegen können, nach Verlassen des Kernbrennstoffs im sogenannten *Moderator* durch Zusammenstöße mit Atomkernen des Moderators abgebremst werden, bis sie die mittlere Energie dieser Kerne, d. h. deren thermische Energie, angenommen haben. Diese sogenannten *thermischen Neutronen* gelangen dann mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit wieder in den Kernbrennstoff und können dort weitere Spaltungen bewirken (um Neutronenverluste zu vermeiden, wird die Reaktionszone des Kernreaktors einschließlich Moderator mit einem besonderen *Neutronenreflektor* umgeben). Zur möglichst schnellen Abbremsung der Neutronen verwendet man stets solche Bremssubstanzen, deren Atome oder Moleküle möglichst die gleiche Masse wie das Neutron haben. Je verschiedener die Massen sind, desto weniger Energie kann bei einem Stoß übertragen werden. Besonders wirksame Moderatoren sind normales Wasser, schweres Wasser, Kohlenstoff und Beryllium. Von diesen ist schweres Wasser wegen seines geringen Neutroneneinfangquerschnitts am günstigsten. Normales Wasser dagegen hat einen hohen Einfangquerschnitt und kann deshalb nur in Verbindung mit angereichertem Uran verwendet werden. Wird die Kernkettenreaktion auf konstantem Leistungsniveau aufrechterhalten, so ist der Zustand des Kernreaktors *stationär*. Wenn das Verhältnis der Neutronenzahlen in zwei aufeinanderfolgenden Spaltungsgenerationen, der sogenannte Multiplikationsfaktor, größer als 1 ist, nennt man das System *überkritisch;* die Spaltungsrate und daher auch die Neutronendichte und die Leistung nehmen ständig zu. Wenn der Multiplikationsfaktor kleiner als 1 ist, d. h. wenn der Kernreaktor *unterkritisch* ist, nehmen Neutronendichte und Leistung ständig ab.

Die Steuerung der im Kernreaktor ablaufenden Kernkettenreaktion kann z. B. durch Änderung der Menge des spaltbaren Materials im Reaktorkern oder der Anordnung von Moderator und Brennstoff erfolgen. Praktisch nutzt man fast ausschließlich die Tatsache aus, daß die Atomkerne mancher Stoffe einen sehr hohen Einfangquerschnitt für Neutronen haben. Man baut also in den Kernreaktor Regel- und Steuerstäbe, z. B. aus Cadmium, Bor oder Hafnium ein, die von außen mehr oder weniger weit in die Reaktionszone eingeschoben werden können. Ihre Eintauchtiefe muß gerade so groß sein, daß pro Kernspaltung im Mittel nur ein entstehendes Neutron für eine neue Spaltung übrig bleibt.

Die bei der Kernspaltung entstehenden Spaltprodukte sind normalerweise nicht stabil, sondern wandeln sich durch eine Folge von radioaktiven Zerfällen unter Aussendung von Beta- und Gammastrahlung in stabile Atomkerne um. Ein Kernreaktor ist daher nicht nur eine sehr starke Neutronenquelle, sondern auch eine ebenso intensive Quelle radioaktiver Strahlung. Er wird deshalb mit einer die Strahlen absorbierenden Schutzwand, dem *Abschirmschild*, umgeben, um Bedienungspersonal und Umgebung vor den gefährlichen Strahlen zu schützen. In der Praxis haben sich Beton, Schwerspat, Wasser, Eisen und Blei sehr gut als Abschirmmaterialien bewährt.

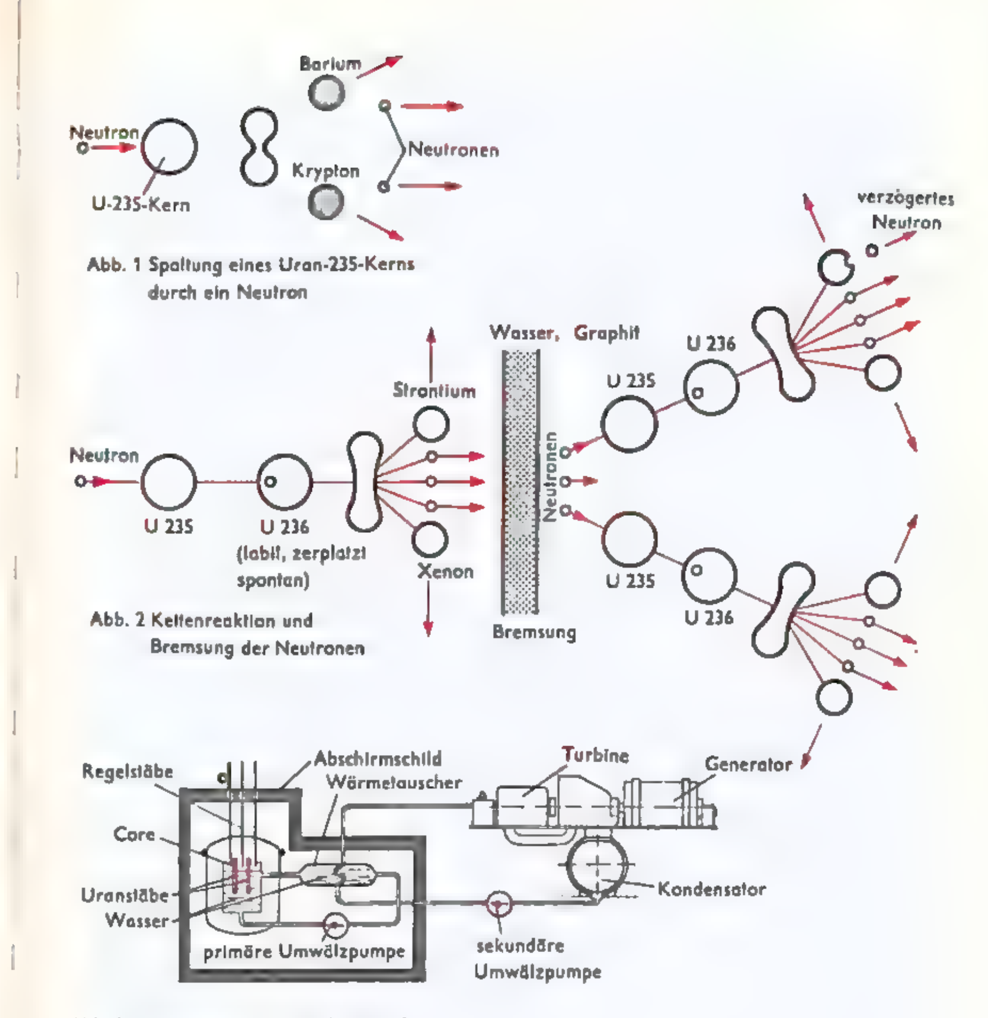


Abb. 1 Spaltung eines Uran-235-Kerns durch ein Neutron

Abb. 2 Kettenreaktion und Bremsung der Neutronen

Abb. 3 Druckwasserreaktor schematisch

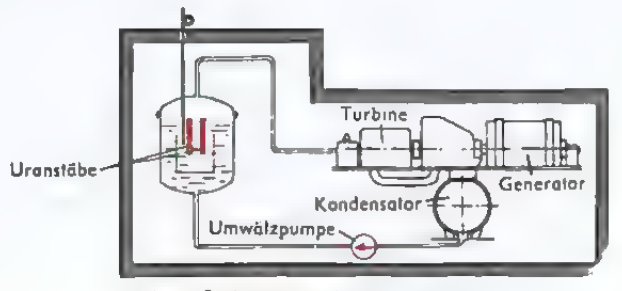


Abb. 4 Siedewasserreaktor schematisch

KERNREAKTOR II (BAUWEISEN UND TYPEN)

Druckwasserreaktor (PWR, Abk. für: *Pressurized Water Reactor):* Der Druckwasserreaktor ist ein einfacher thermischer Reaktor, in dem Wasser als Kühlmittel und zugleich als Moderator dient. Der Druck im Primärkreislauf und die dadurch verursachte Siedepunktserhöhung ist so groß, daß noch keine Dampfbildung im Reaktorkern (Core), in dem sich Kernbrennstoff und Moderator befinden, auftreten kann. Es wird sowohl leichtes Wasser (H_2O) als auch schweres Wasser (D_2O) als Kühlmittel verwendet. Das Wasser des Primärkreises wird ständig umgepumpt. Die im Core vom Wasser aufgenommene Wärme gelangt über einen Wärmeaustauscher zum Sekundärkreis; dort wird sie über Turbine und Generator in elektrische Energie umgewandelt.
Ein Beispiel für diesen Reaktortyp ist der in Obrigheim am Neckar errichtete Druckwasserreaktor (KWO), der bei einer thermischen Leistung von 907,5 MW eine elektrische Leistung von 283 MW liefert (Abb. 1). Der Reaktorkern ist in einem Druckbehälter mit einem Innendurchmesser von 3,27 m untergebracht. Das Kühlwasser tritt mit einer Temperatur von 283° C in den Reaktor ein und verläßt den Druckbehälter mit einer Temperatur von 310° C. Im Dampferzeuger wird Sattdampf von 50 at/263° C erzeugt. Als Kernbrennstoff dient schwach angereichertes Urandioxid (im Mittel 3 % U 235), das sich in gasdicht verschlossenen Zircaloyrohren befindet. 180 solcher Brennstäbe sind zu einem *Brennelement* zusammengefaßt. Der Reaktorkern wird von 121 solcher Brennelemente gebildet. Für kurzfristige Regelvorgänge sind 27 gleichmäßig über den Reaktorkern verteilte Regelstäbe vorgesehen, die von oben in den Kern eingefahren werden.
Siedewasserreaktor (BWR, Abk. für: *Boiling Water Reactor): Der* Siedewasserreaktor trägt seinen Namen nach der in ihm vorgehenden Phasenumwandlung des Kühlmittels, das zugleich auch als Moderator dient. Sein Aufbau ist dem Druckwasserreaktor ähnlich. Auch die verwendeten Brennelemente unterscheiden sich kaum voneinander. Das Reaktorgefäß besitzt in der Regel oberhalb des Wasserspiegels einen mit Einbauten versehenen Dampfdom, durch den die Phasentrennung begünstigt und kleinere Druckschwankungen ausgeglichen werden. Als Kühlmittel und Moderator wird H_2O verwendet; es ist aber grundsätzlich auch möglich, D_2O einzusetzen. Im Reaktor wird normalerweise Sattdampf erzeugt, der entweder direkt zur Turbine geleitet wird oder sekundären Dampf in einem Dampfumformer erzeugt. Je nachdem, ob zwischen Reaktor und Turbine ein die gesamte Energie übertragender Hauptwärmetauscher vorhanden ist, spricht man von einem direkten oder indirekten Kreislauf. Abb. 2 zeigt eine im direkten Kreis geschaltete Anlage: Innerhalb des Reaktorkerns strömt das Wasser bzw. das Dampf-Wasser-Gemisch von unten nach oben. Nach der Trennung der beiden Phasen oberhalb des Kerns strömt der Sattdampf direkt zur Turbine, während die flüssige Phase in einem außen angeordneten Ringraum nach unten strömt. Dort wird die den erzeugten Sattdampf entsprechende Speisewassermenge wieder zugegeben.
Die dynamischen Eigenschaften lassen sich verbessern, wenn man das sogenannte Zweikreissystem verwendet (Abb. 3). Aus dem Druckbehälter gelangt ein Gemisch aus Dampf und Wasser in den Wasserabscheider. Der Dampf strömt weiter über ein Ventil zur Turbine. Das abgeschiedene Wasser wird über eine Pumpe und über den Wärmeaustauscher in den Reaktorkessel zurückbefördert. Auf der Sekundärseite des Wärmeaustauschers entsteht Dampf niedrigen Druckes, der über ein Ventil ebenfalls zur Turbine befördert wird. Nach diesem System arbeitet das in Grundremmingen erbaute KRB-Kernkraftwerk. Der KRB-Reaktor liefert bei einer thermischen Leistung von 801 MW eine elektrische Leistung von 237 MW (Abb. 4).

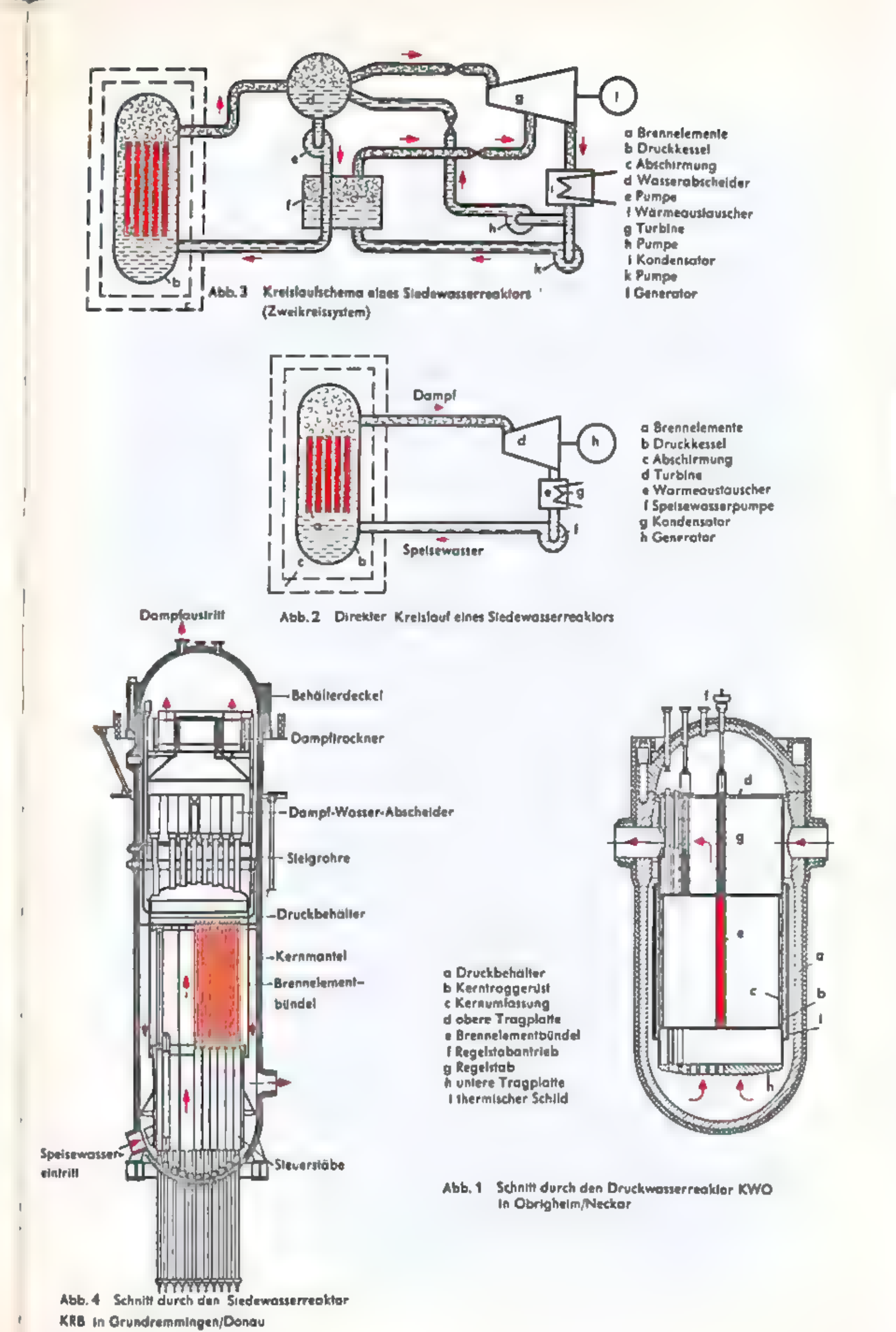


Abb. 3 Kreislaufschema eines Siedewasserreaktors (Zweikreissystem)

Abb. 2 Direkter Kreislauf eines Siedewasserreaktors

Abb. 4 Schnitt durch den Siedewasserreaktor KRB in Grundremmingen/Donau

Abb. 1 Schnitt durch den Druckwasserreaktor KWO in Obrigheim/Neckar

KERNREAKTOR III
(BAUWEISEN UND TYPEN)

Gasgekühlter Reaktor vom Typ Calder Hall (Gas-Graphit-Reaktor): Zu den erprobten Reaktortypen zählt neben den Druckwasser- und Siedewasserreaktoren der gasgekühlte Reaktor vom Typ Calder Hall. Dieser Reaktor wird mit natürlichem Uran betrieben. Als Moderator wird Graphit und als Kühlgas Kohlendioxid (CO_2) verwendet (Kreislaufschema, Abb. 1). Der Reaktorkern besteht aus einem großen zylindrischen Graphitklotz, der von Kanälen durchzogen ist. Die stabförmigen Brennelemente sind in diesen Kanälen so angeordnet, daß zwischen Brennelement und Kanalwand ein freier Spalt bleibt, durch den das Kühlgas strömt. Die vom Gas im Reaktorkern aufgenommene Wärmemenge wird in einem außerhalb des Reaktordruckbehälters angeordneten Wärmeaustauscher an den sekundären Wasser-Dampf-Kreislauf übertragen. In diesem Dampferzeuger wird Sattdampf erzeugt, der eine entsprechende Turbine antreibt. Der gasgekühlte Reaktor hat gegenüber den flüssigkeitsgekühlten den Vorteil, daß keine Korrosionsprobleme auftreten.
Der Calder-Hall-Reaktor liefert bei einer thermischen Leistung von 180 MW eine elektrische Leistung von 34,5 MW. Der Innendurchmesser des Behälters beträgt 11,3 m, die Höhe 21,8 m, die Wandstärke etwa 50 mm. In diesem Druckbehälter ist auf einem Rost der aus 58 000 Blöcken bestehende Graphitkörper aufgebaut, der 1696 senkrechte Brennstoffkanäle enthält. Die Brennstoffelemente bestehen aus natürlichem Uran, das in eine Magnesiumhülle mit spiralförmigen Rippen eingeschoben ist. Das Kühlgas strömt in den Kanälen an den Brennelementen entlang kreisend nach oben. Ein Uranstab hat einen Durchmesser von rd. 30 mm und eine Länge von rd. 1,0 m. Der Reaktor wird von 160 Stäben gesteuert, die von oben in den Reaktorkern eingefahren werden. Das Kühlgas steht unter einem Druck von 6,8 at. Beim Eintritt in den Reaktor hat das Gas eine Temperatur von 140° C, beim Austritt eine Temperatur von 345° C.
Hochtemperaturreaktor (HTR): Der graphitmoderierte gasgekühlte Hochtemperaturreaktor ist im Grunde genommen eine Weiterentwicklung der englischen Gas-Graphit-Reaktoren. Während für diese Reaktoren die Verwendung von Kohlendioxid als Kühlmittel und der Einsatz metallumhüllter Brennelemente kennzeichnend sind und die Leistungsdichten bei etwa 1 MW/m³ liegen, wird beim Hochtemperaturreaktor auf eine Metallumhüllung der Brennelemente verzichtet und Helium als Kühlmittel verwendet; die Leistungsdichten betragen bis zu 10 MW/m³. Die Kühlmitteltemperaturen liegen bei diesem Reaktor über 700° C, so daß der Einsatz moderner Turbogeneratoren möglich ist.
Der wegen der hohen Temperaturen notwendige Verzicht auf eine Metallumhüllung der Brennelemente hat im wesentlichen zwei Konsequenzen: Da die Neutronenverluste im Reaktorkern dadurch sehr niedrig werden, bleiben mehr Neutronen für die Erzeugung von neuem spaltbarem Material übrig. Diese guten Konversionseigenschaften des Hochtemperaturreaktors ermöglichen lange Standzeiten der Elemente und eine gute Ausnutzung des eingesetzten Brennstoffes. Andererseits stellt bei nichtumhüllten Brennelementen die Spaltproduktfreisetzung ein besonderes Problem dar. Um eine unzulässig hohe Freisetzung der Spaltprodukte und damit eine starke Verseuchung des Primärkreislaufes zu verhindern, werden die einzelnen Brennstoffteilchen mit einem undurchlässigen Material umhüllt. Als Brennstoff dient ein Uran-Thorium-Gemisch in Carbidform, als Hüllmaterial wird pyrolytisch abgeschiedener Kohlenstoff verwendet. Die Carbidteilchen haben einen Durchmesser von 200 µm, die Hüllschicht eine Dicke von 100 µm. Diese Partikel werden mit Graphitpulver in eine den Brennelementen entsprechende Form gepreßt. Es werden sowohl stab- als auch kugelförmige Brennelemente verwendet.

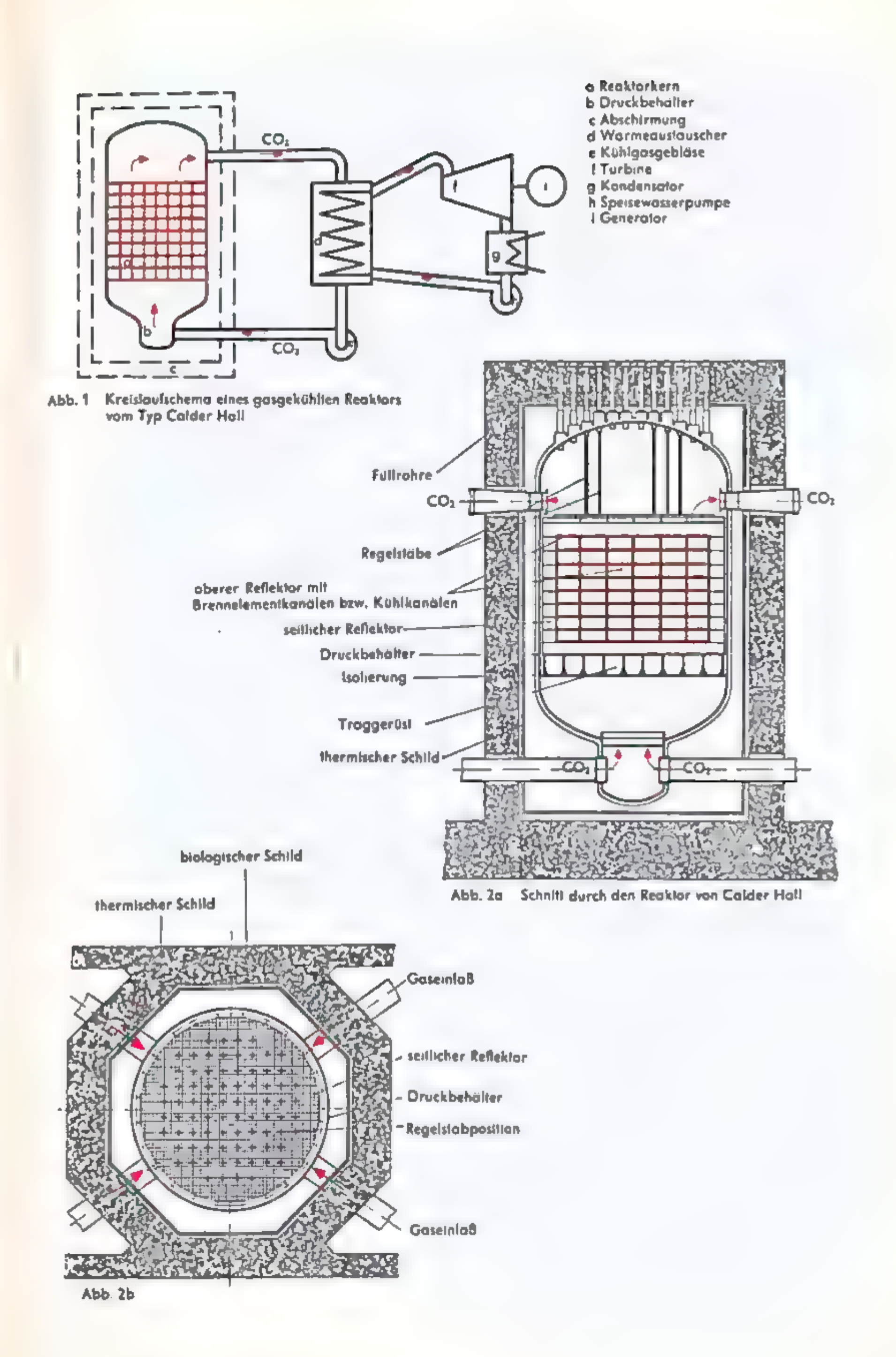


Abb. 1 Kreislaufschema eines gasgekühlten Reaktors vom Typ Calder Hall

Abb. 2a Schnitt durch den Reaktor von Calder Hall

Abb. 2b

KERNREAKTOR IV
(BAUWEISEN UND TYPEN)

Der in Peach Bottom (Pennsylvania, USA) gebaute HTGR (Abkürzung für: *High Temperature Gas-Cooled Reactor)* hat stabförmige Brennelemente (Abb. 1). Jedes Brennelement besteht aus einem Graphithohlzylinder von etwa 3,7 m Länge und einem Durchmesser von 9 cm, in dem sich auf einem massiven Graphitstab lose aufgereihte Ringe befinden, die den Kernbrennstoff enthalten. Der Reaktorkern besteht aus 804 solcher Stäbe, die von einem 60 cm dicken radialen Graphitreflektor umschlossen werden. Der Reaktordruckbehälter hat eine Höhe von etwa 9 m und einen Durchmesser von rd. 4 m. Die 36 Regel- und 19 Notabschaltstäbe werden von unten in den Kern eingefahren (Abb. 2).

Der in der BRD in Jülich gebaute, als AVR-Reaktor bezeichnete Hochtemperaturreaktor ist ein sogenannter *Kugelhaufenreaktor* (Abb. 3). In ihm werden kugelförmige Brennelemente verwendet, die es gestatten, den Brennstoff während des Betriebes einzuführen und aus dem Reaktor zu entfernen. Neben den betrieblichen Vorteilen ergibt sich durch die kontinuierliche Beschickung mit Brennstoff die Möglichkeit, Überschußreaktivität für den Abbrand zu vermeiden und die Konversionseigenschaften des Hochtemperaturreaktors noch weiter zu verbessern.

Das Brennelement des Kugelhaufenreaktors (Abb. 4) besteht aus einer mit einem Schraubstopfen verschlossenen Graphithohlkugel mit einem Durchmesser von 6 cm und einer Schalenstärke von 1 cm. Sie ist mit einer sogenannten Matrix gefüllt, die hoch angereichertes Uran in Form von beschichteten Uran-Thorium-dicarbid-Teilchen, vermischt mit Graphitpulver, enthält. Eine Schüttung von 100 000 Kugeln bildet den Reaktorkern, der von einem 50 cm dicken Graphitreflektor umschlossen wird. Der Graphitreflektor ist aus Gründen der Wärmeisolierung und zur Strahlenabschirmung von einem Kohlesteinmantel und einem thermischen Schild umgeben. Alle dem Primärkreislauf angehörigen Teile einschließlich des Wärmeaustauschers sind in einem Behälter untergebracht. Der Reaktorkern befindet sich im unteren Teil des Druckbehälters, darüber angeordnet im oberen Teil der Dampferzeuger. Das Kühlgas wird von zwei Gebläsen umgepumpt, die sich unten im sogenannten Gebläsedom befinden. Als Kühlgas wird Helium von 10 at verwendet. Im Reaktorkern wird das Gas von 175° C auf 850° C aufgeheizt. Im Dampferzeuger wird Heißdampf von 505° C und 75 at erzeugt. Die Anlage erreicht bei einer thermischen Reaktorleistung von 46 MW eine elektrische Leistung von 15 MW.

Natrium-Graphit-Reaktor: Um die in einem Reaktor anfallende Wärme bei möglichst hohen Temperaturen abführen zu können und um trotzdem dickwandige Druckgefäße zu vermeiden, muß man als Wärmeträger Metalle mit niedrigem Schmelzpunkt und hohem Siedepunkt verwenden. Ein in dieser Hinsicht geeignetes Kühlmittel ist Natrium, das aber bei Neutronenbestrahlung stark radioaktiv wird, weshalb der Wärmeaustauscher nicht unmittelbar an den Primärkreislauf angeschlossen werden kann, sondern ein Sekundärkreis dazwischengeschaltet werden muß. Dadurch wird vermieden, daß radioaktives Material in der Nähe des zu verdampfenden Wassers gelangt. Als Kühlmittel für den Sekundärkreislauf verwendet man in den meisten Fällen gleichfalls Natrium (Abb. 1, S. 69). Hinzu kommt die Reaktionsfreudigkeit des Natriums mit Wasser und mit Sauerstoff der Luft und die bei kleinen Beimengungen von Natriumoxid erhöhte Korrosion des als Konstruktionsmaterial in Frage kommenden rostfreien Stahls. Im Vergleich mit Moderatorstoffen hat Natrium einen relativ großen Einfangquerschnitt für Neutronen; deshalb ist es notwendig, besondere Vorkehrungen gegen ein Abfließen des Natriums aus dem Reaktorkern zu treffen, um so eine plötzliche Verstärkung der Kettenreaktion zu vermeiden.

Abb 1. Schnitt durch das Brennelement des HTGR in Peach Bottom

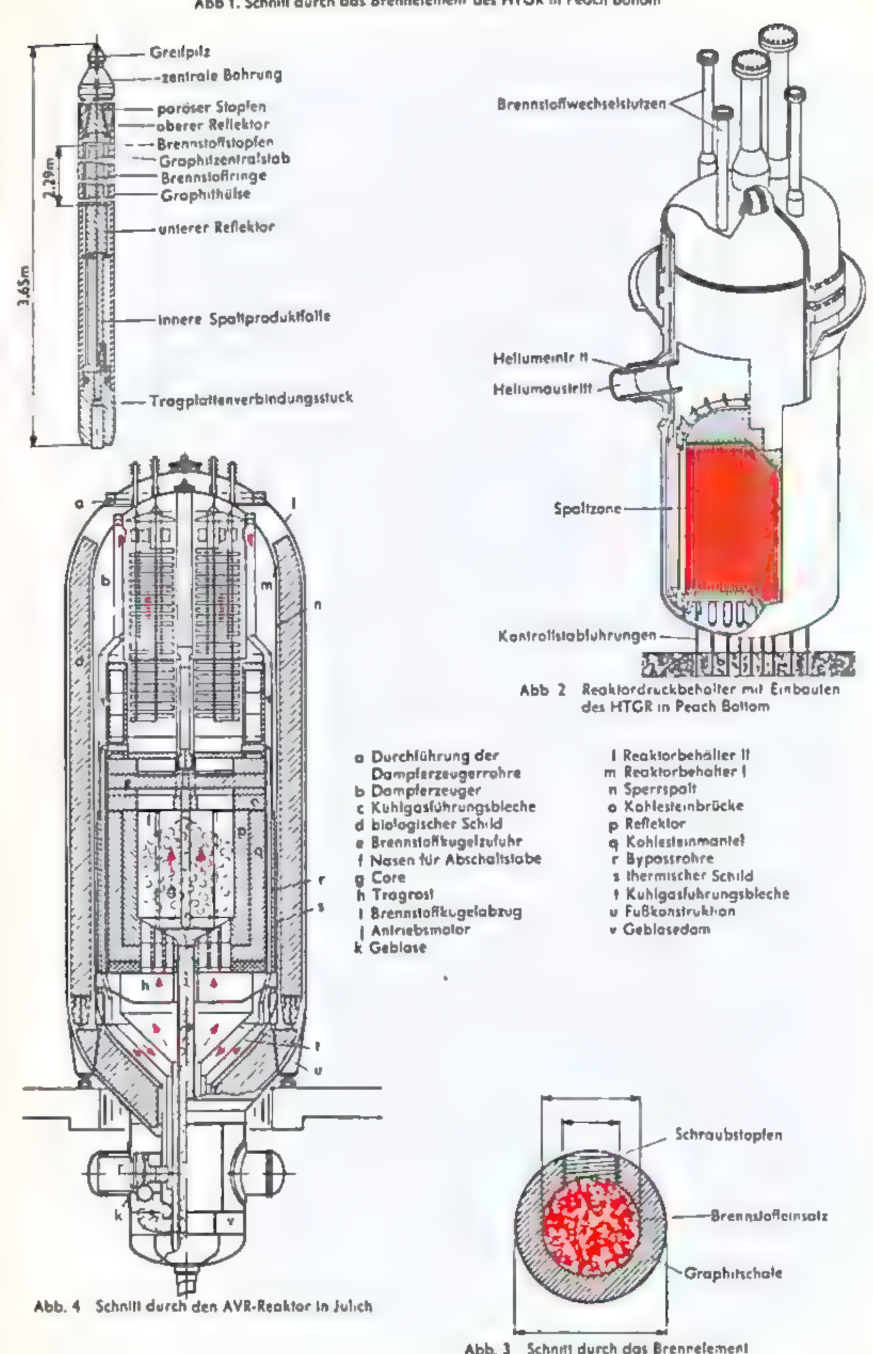


Abb 2 Reaktordruckbehälter mit Einbauten des HTGR in Peach Bottom

Abb. 4 Schnitt durch den AVR-Reaktor in Jülich

Abb. 3 Schnitt durch das Brennelement des AVR in Jülich

KERNREAKTOR V
(BAUWEISEN UND TYPEN)

Als Moderator des Natrium-Graphit-Reaktors wird Graphit verwendet. Dabei muß beachtet werden, daß flüssiges Natrium in den Graphit eindringen kann, wodurch die schädliche Neutronenabsorption im Moderator wesentlich erhöht wird. Man kapselt deshalb die Graphitelemente des Moderators mit Zirkonium. Diese Umhüllung kann man vermeiden, wenn man als Moderator Zirkoniumhydrid wählt, wie es bei dem von der Firma Interatom entwickelten sogenannten KNK-Reaktor (Abb. 2) vorgesehen ist, dessen Reaktorkern sich in einem Stahlgefäß von 1,9 m Durchmesser befindet. Die 66 Brennelemente des Kerns werden von unten nach oben vom Kühlmittel durchströmt. Das einzelne Brennelement besteht aus zwei ringförmig angeordneten Brennstabreihen. Sowohl der zentrale zylindrische Hohlraum als auch der ringförmige Zwischenraum ist mit Zirkoniumhydridkörpern ausgefüllt, die den Moderator bilden und beim Brennelementwechsel im Reaktor bleiben. Die Kontrollstäbe befinden sich auf Brennelementpositionen. Als Reflektor wurde ein Mantel aus rostfreiem Stahl von 13 cm Dicke gewählt. Die beiden Natriumdampferzeuger von je 29 MW thermischer Leistung liefern Heißdampf von 510° C und 85 at.

Brutreaktoren: Die Tatsache, daß bei der Kernspaltung je Spaltung durch ein Neutron mehr als ein neues Neutron freigesetzt wird, ermöglicht nicht nur die Aufrechterhaltung einer Kettenreaktion, sondern unter bestimmten Bedingungen auch das „Brüten" von neuem spaltbarem Material. Als Brüten bezeichnet man den Sachverhalt, daß bei der Kettenreaktion mehr spaltbares Material erzeugt wird, als gleichzeitig zur Energieerzeugung verbraucht wird. Für diesen Prozeß eignen sich die Isotope Uran 238 und Thorium 232. Bei dem auf dem Uran basierenden Brutprozeß werden die bei der Kernspaltung der U-235-Kerne entstehenden schnellen Neutronen von den U-238-Kernen absorbiert; diese wandeln sich in Kerne des spaltbaren Plutonium 239 um. Dieser sogenannte U-Pu-Zyklus läuft mit schnellen Neutronen rascher ab als mit thermischen Neutronen. Bei dem auf dieser Basis arbeitenden sogenannten *schnellen Brutreaktor* entfällt der zur Neutronenabbremsung notwendige Moderator. Das wiederum führt zu einem kompakten Reaktorkern, der nur die notwendigen Brennelemente und das Kühlmittel enthält. Im Gegensatz zum U-Pu-Zyklus arbeitet der Thorium-Uran-Zyklus (Th-U-Zyklus) mit thermischen Neutronen günstiger. Bei diesem Prozeß bewirken die bei der Kernspaltung von U-235-Kernen entstehenden Neutronen eine Umwandlung von Th 232 in spaltbares U 233. Gegenüber dem schnellen Brutreaktor ist der *thermische Brutreaktor* durch einen kleineren Brutgewinn, einem kleineren Spaltstoffbedarf sowie durch das Fehlen besonderer Sicherheitsprobleme gekennzeichnet. Wesentlich für den Einsatz des Brutprozesses ist, daß der Übergang vom normalen Kernreaktor zu Brutreaktoren beim U-Pu-Zyklus eine 50fach bessere Ausnutzung der Uranvorräte ermöglicht und beim Th-U-Zyklus die Ausnutzung der großen in der Natur vorkommenden Thoriumreserven gestattet. Während die thermischen Brüter kontinuierlich aus vorhandenen Typen (Druck- oder Siedewasserreaktor mit D_2O-Kühlung, Hochtemperaturreaktor) entwickelt werden können, stellen die schnellen Brüter einen weitgehend neuen Weg der Technik dar. Die ersten Versuchsreaktoren dieser Art wurden in USA, in Großbritannien und in der UdSSR gebaut. Alle verwenden stabförmige Brennelemente und Natrium als Kühlmittel. Ein typisches Brennelement zeigt Abb. 3. Die Kernzone besteht dabei aus mehreren Hüllrohren, in denen sich der Brennstoff (U 235) zumeist in metallischer Form befindet. Darüber und darunter sind Brutzonen angeordnet, in denen aus dem Reaktor entweichende Neutronen aufgefangen werden. Diese Zonen bestehen gleichfalls aus mehreren Hüllrohren, in denen sich U 238 als Brutstoff befindet. Die ganze Anordnung ist in einem Brennelementkasten aus rostfreiem Stahl untergebracht.

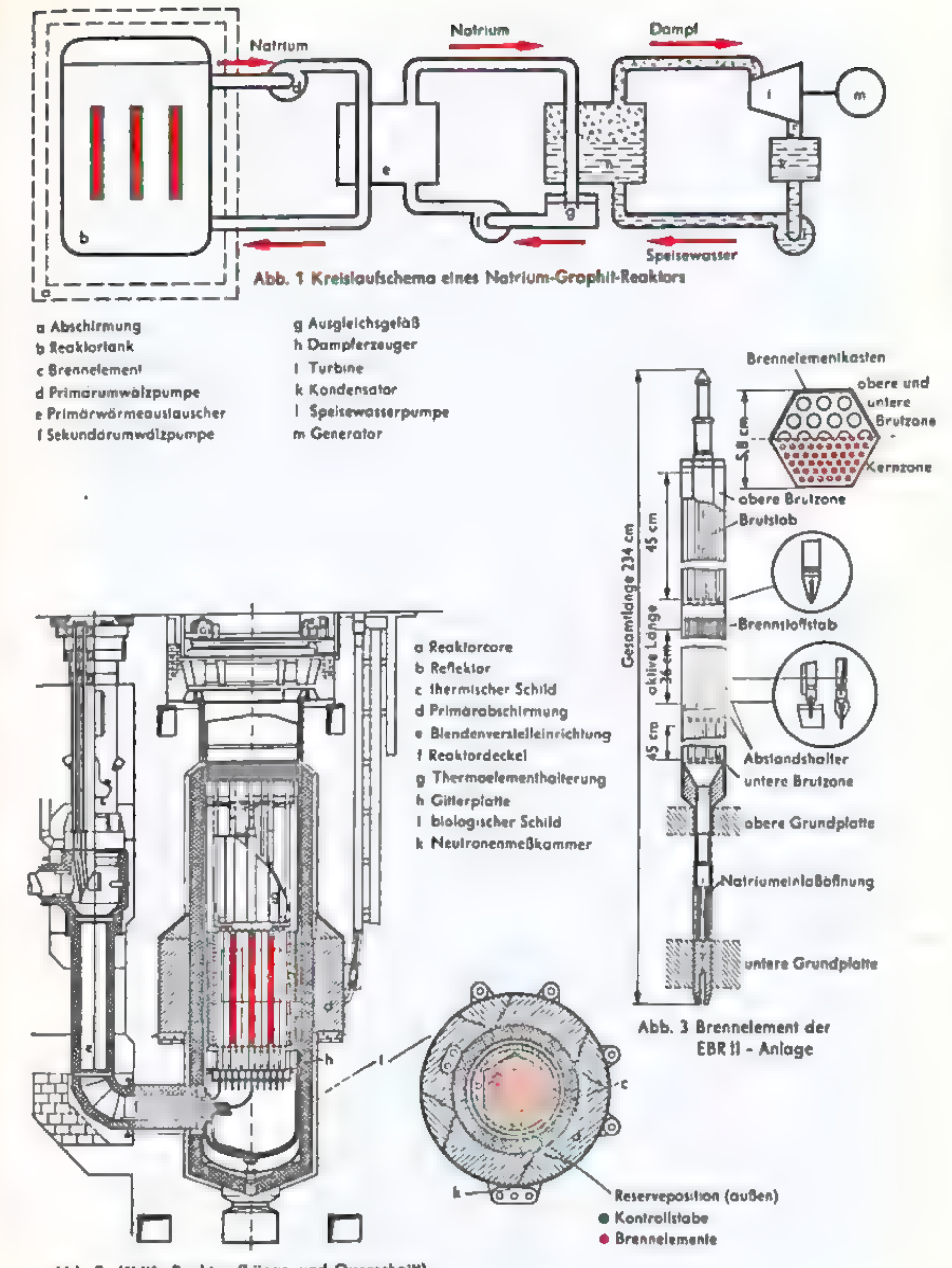


Abb. 1 Kreislaufschema eines Natrium-Graphit-Reaktors

Abb. 2 KNK-Reaktor (Längs- und Querschnitt)

Abb. 3 Brennelement der EBR II - Anlage

KREISBESCHLEUNIGER

Für Untersuchungen des Baues der Atomkerne benötigt man „Geschosse" von hoher Energie. Als „Geschosse" eignen sich besonders Elementarteilchen; da die meisten von ihnen eine elektrische Ladung tragen, kann man sie durch elektromagnetische Felder beschleunigen. Da diese Beschleunigung in der Regel in einer Folge von Kreisbahnumläufen der Elementarteilchen vorgenommen wird, nennt man die unterschiedlich arbeitenden Beschleunigungsapparate allgemein Kreisbeschleuniger.

Das *Betatron* (Abb. 1) ist im Aufbau einem Transformator sehr ähnlich: Ein Eisenkern trägt eine Erregerwicklung (sie entspricht beim Transformator der Primärwicklung), die von einem Wechselstrom durchflossen wird. An die Stelle der Transformatorsekundärwicklung tritt hier eine evakuierte Ringröhre, in die Elektronen eingeschossen werden. Durch die magnetische Induktion entsteht in der Ringröhre ein ringförmiges elektrisches Wechselfeld (Wirbelfeld) in einer zum Magnetfeld senkrechten Richtung, das die Elektronen beschleunigen, aber auch verzögern kann. Da man aber nur an einer Beschleunigung interessiert ist, muß man beim Betatron im intermittierenden Betrieb arbeiten. Das geschieht in der Weise, daß man in dem Augenblick Elektronen in die Ringröhre einschießt, in dem die elektrische Wechselfeldstärke ihren maximalen Wert hat (das muß aus Gründen der Bahnstabilität so sein). In der darauffolgenden Viertelperiode der Wechselfeldstärke werden die Elektronen durch das Feld beschleunigt. Die Feldstärke nimmt dabei stetig ab. Spätestens am Ende dieser Viertelperiode müssen die Elektronen aus der Ringröhre ausgeschleust werden, weil sie sonst in der folgenden Halbperiode verlangsamt werden.

Nach der klassischen Elektrodynamik ist die Umlauffrequenz eines geladenen Teilchens, das in einem Magnetfeld kreist, unabhängig von seinem Bahnradius. Die Energie des Teilchens aber wächst mit seiner Bahngeschwindigkeit. Diese beiden Gesetzmäßigkeiten führten zur Konstruktion des *Zyklotrons*. In der Abb. 2a ist die Beschleunigungskammer im homogenen Magnetfeld zwischen den Polschuhen zu erkennen. Die Vakuumkammer selbst zeigt Abb. 2b. In der Mitte der Kammer ist eine Ionenquelle angebracht. Die Ionen verlassen die Quelle mit einer bestimmten Geschwindigkeit und werden vom Magnetfeld auf Kreisbahnen gezwungen. Da ihre Kreisfrequenz konstant ist, kann man die Ionen durch ein hochfrequentes elektrisches Wechselfeld der gleichen Frequenz beschleunigen. Das geschieht durch zwei halbkreisschachtelförmige Elektroden, an die von außen die Hochfrequenzspannung angelegt wird. Bei jedem Übergang eines Ions von einer Halbkreisschachtel in die andere wird es durch das zwischen den beiden Schachtelhälften herrschende elektrische Feld beschleunigt. Dabei ändert sich zwar nicht die Umlauffrequenz, wohl aber die Geschwindigkeit des Ions und damit der Bahnradius. So nimmt das Ion, während es in stufenweise größer werdenden Kreisbahnen umläuft, zunehmend mehr Energie auf. Schließlich wird es mit Hilfe eines Ablenkkondensators aus der Vakuumkammer ausgeschleust.

Während das Zyklotron Teilchen im Bereich kleiner Geschwindigkeiten beschleunigt, dient das *Synchrotron* (Abb. 3) der Beschleunigung von Teilchen, deren Geschwindigkeit nahe der Lichtgeschwindigkeit liegt. Jedoch ist die Wirkungsweise beider Beschleunigungsmaschinen ähnlich. Im Unterschied zum Zyklotron bleibt beim Synchrotron sowohl der Teilchenbahnradius als auch die Umlauffrequenz zeitlich konstant, während das Magnetfeld, ähnlich wie beim Betatron, mit der Zeit anwächst. Daß trotz der nahezu konstanten Teilchengeschwindigkeit eine Energiesteigerung zustande kommt, ist nur mit Hilfe der Relativitätstheorie zu erklären: Wird die Teilchengeschwindigkeit nahezu gleich der Lichtgeschwindigkeit, so wächst die Masse (und damit die Energie) bei sehr kleiner Geschwindigkeitszunahme sehr rasch an. Der Energiegewinn beim Synchrotron beruht also im wesentlichen nicht auf einer Geschwindigkeits-, sondern auf einer Massenzunahme.

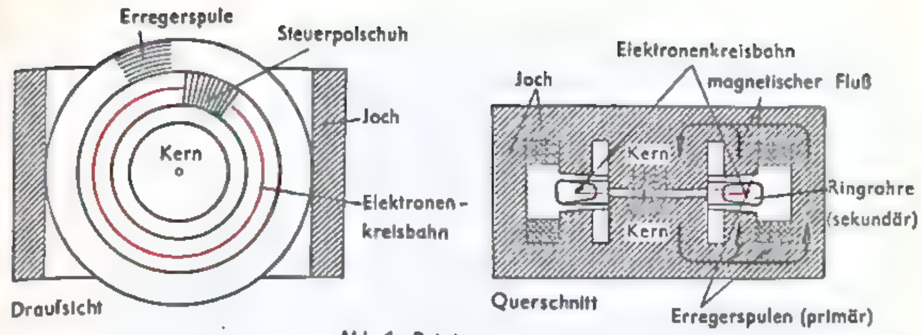


Abb. 1 Betatron

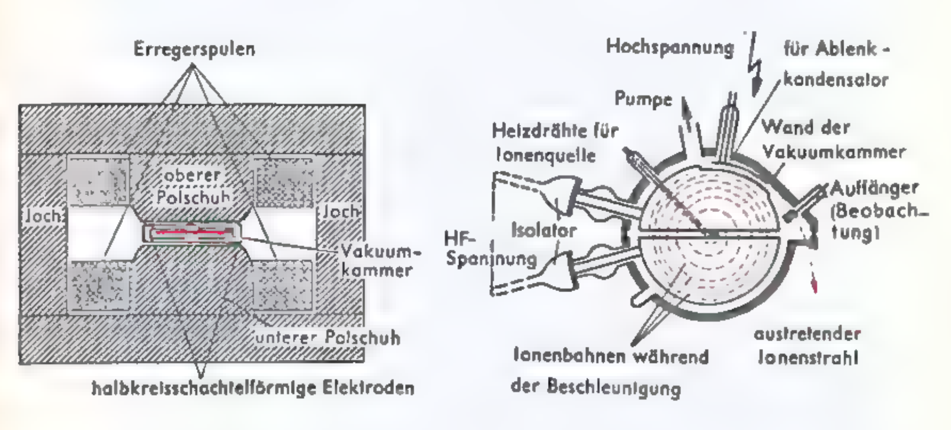


Abb. 2 Zyklotron

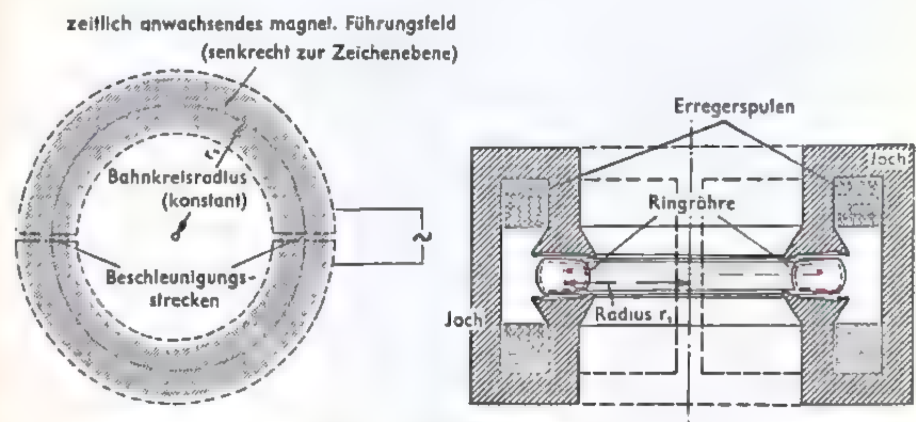


Abb. 3 Synchrotron

LINEARBESCHLEUNIGER

Aus Isolationsgründen ist es nicht möglich, Spannungen mit mehr als etwa 10 Millionen Volt aufrechtzuerhalten. Um geladene Teilchen (Ionen, Elektronen) auf entsprechend höhere Energien zu beschleunigen, muß deshalb das Prinzip der Vielfachbeschleunigung angewendet werden (Abb. 1). Bei Kreisbeschleunigern (vergl. S. 70f.) werden die geladenen Teilchen durch ein magnetisches Führungsfeld auf geschlossenen Kreisbahnen gehalten. Bei jedem Umlauf gewinnen sie in einer oder mehreren Beschleunigungsstrecken einen relativ kleinen Energiebetrag. Eine andere Möglichkeit der Vielfachbeschleunigung wird im Linearbeschleuniger verwirklicht. Hier durchlaufen die Ionen ein vielfach unterteiltes Rohr, dessen einzelne Abschnitte alternierend mit den Polen eines Hochfrequenzgenerators verbunden sind (Abb. 2a). Die Beschleunigung erfolgt jeweils an den Spalten, vorausgesetzt, daß die Teilchen immer im günstigsten Zeitpunkt ankommen, d. h., wenn die Polung richtig ist (Abb. 2b). Während der umgekehrten Halbwelle müssen sich die Ionen im feldfreien Innenraum der Driftröhre befinden (Abb. 2c). Um diese Bedingung zu erfüllen, muß zwischen der Schwingungszahl ν der Hochfrequenz, der Rohrlänge l und der Geschwindigkeit v der Ionen die Beziehung $\nu \cdot l = v$ bestehen, d. h., die Länge l der einzelnen Driftröhren muß wegen der zunehmenden Geschwindigkeit der Teilchen längs des Beschleunigers laufend zunehmen. Damit bei vorgegebener Endgeschwindigkeit die Dimensionen nicht zu groß werden, benützt man relativ hohe Frequenzen (z. B. 400 MHz), die als stehende Wellen in einem großen Vakuumtank erzeugt werden, in dessen Achse sich dann die Driftröhren und zusätzliche magnetische Fokussierungslinsen befinden.

Die Ionen werden in einer Ionenquelle erzeugt und mit Hilfe einer besonderen Spannungsquelle mit einer genügend hohen Anfangsgeschwindigkeit v_0 in den Beschleuniger eingeschossen. Protonenlinearbeschleuniger werden vorwiegend als Injektoren für große Kreisbeschleuniger eingesetzt.

Da Elektronen aufgrund ihrer kleinen Masse schon bei niedrigen Energien nahezu Lichtgeschwindigkeit besitzen, hat sich für Elektronenlinearbeschleuniger das Prinzip der Wanderwellenbeschleunigung durchgesetzt (Abb. 4). Gewisse Analogien bestehen zu den Wellenreitern der Südsee: Genau wie der Wellenreiter immer die gleiche Geschwindigkeit wie die einlaufende Brandungswelle einhalten muß, muß im Wanderwellenbeschleuniger die Phasengeschwindigkeit der Hochfrequenzwelle an jedem Ort gleich der Elektronengeschwindigkeit (die praktisch der Lichtgeschwindigkeit entspricht) sein. Dies wird erreicht durch den Einbau geeignet dimensionierter Blenden in einem zylindrischen Hohlleiter, in dem sich eine Konfiguration des elektromagnetischen Feldes mit der elektrischen Feldstärke in Längsrichtung aufbaut (Abb. 3). Das synchron mit der Welle mitlaufende Elektron „sieht" dann längs der Beschleunigungsstrecke dauernd eine beschleunigende elektrische Feldstärke. Die verwendeten Frequenzen liegen meistens bei 3000 MHz (entsprechend 10 cm Wellenlänge). Die Energiezunahme des hochenergetischen Elektrons äußert sich aber nicht in einer Geschwindigkeitszunahme, sondern nach der Relativitätstheorie in einer Massenzunahme. Um auf kurzen Strecken hohe Energien erreichen zu können, braucht man sehr hohe Hochfrequenzleistungen (z. B. 8 Megawatt, um Elektronen auf einer Strecke von 3 m auf eine Energie von 30 Millionen Elektronenvolt zu bekommen).

Ein besonderer Vorteil des Linearbeschleunigers ist die Möglichkeit, beliebig viele Beschleunigungsstrecken hintereinander anzuordnen. Der größte Elektronen-Linearbeschleuniger befindet sich in Stanford, Kalifornien. Er ist 3 km lang und erreicht in seiner ersten Ausbaustufe eine Endenergie der Elektronen von 20 Milliarden Elektronenvolt.

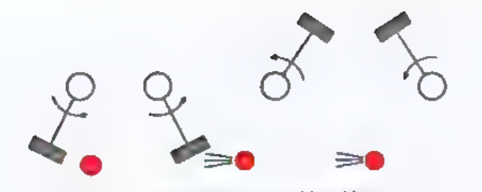


Abb. 1 Mechanische Vielfachbeschleunigung

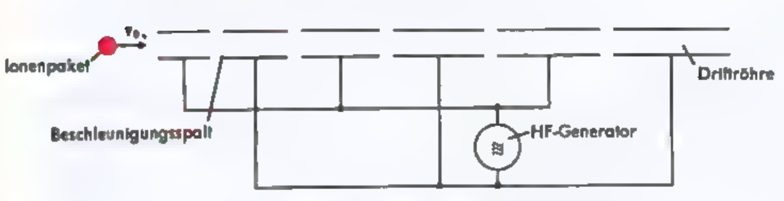


Abb. 2a Schema eines Linearbeschleunigers

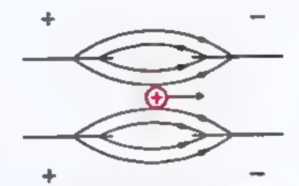


Abb. 2b Ionenpaket im Beschleunigungsspalt

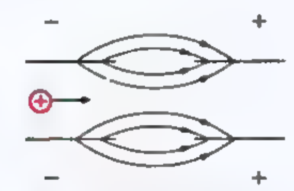


Abb. 2c Ionenpaket im feldfreien Innenraum einer Driftröhre

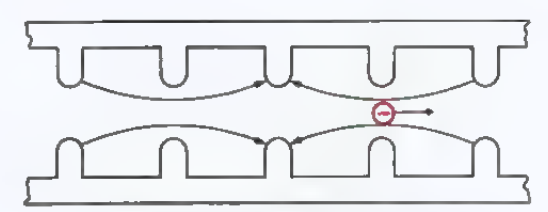


Abb. 3 Momentbild der elektrischen Feldlinien im Hohlleiter

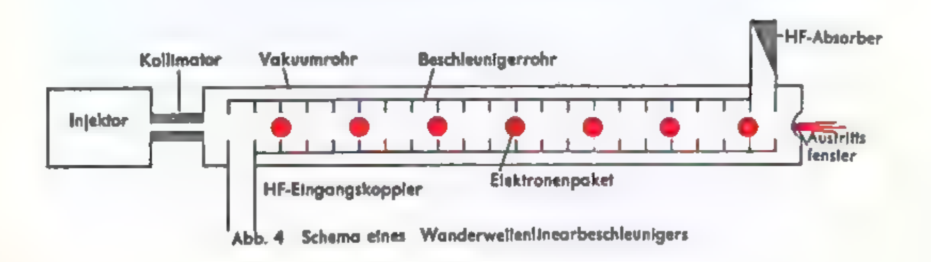


Abb. 4 Schema eines Wanderwellenlinearbeschleunigers

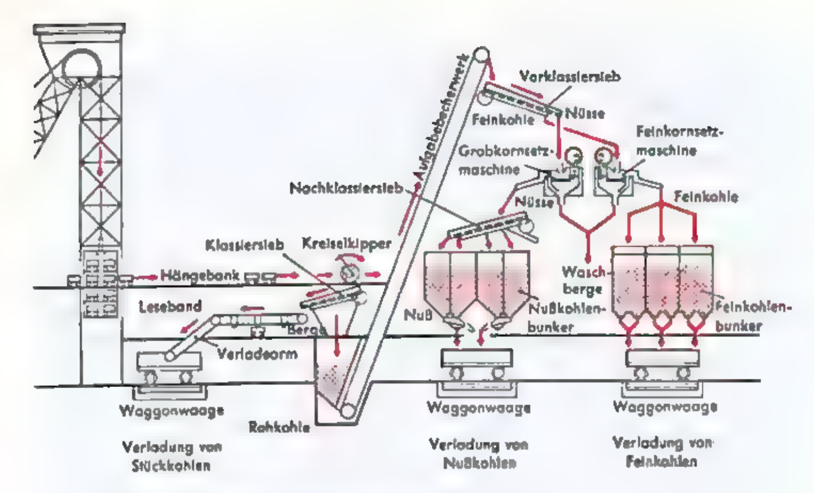
KOHLE

Aus den Pflanzen vorzeitlicher Sumpfwälder bildeten sich im Laufe von Jahrmillionen durch einen Inkohlungsprozeß (Umwandlung durch Bakterien, Druck- und Temperaturerhöhung) die ältere Steinkohle und die jüngere Braunkohle. Fortschreitendes Absinken ganzer Gebiete und Klimaänderungen führten zur Überschwemmung und Verschüttung der üppigen Moorwälder, in denen im Karbon — vor etwa 300 Millionen Jahren — neben Sträuchern und Kräutern verschiedener Art vor allem baumartige Schachtelhalm-, Farn- und Bärlappgewächse (Siegel- und Schuppenbäume) gediehen, im Tertiär — vor etwa 30 Millionen Jahren — besonders Laub- und Nadelbäume (Mammutbäume, Sumpfzypressen und Kiefernarten) vorherrschten. Druck, Hitze und zeitliche Einflüsse verwandelten die Cellulose, das Lignin und die anderen Pflanzenstoffe in Kohle. Chemisch besteht Kohle aus Tausenden von Einzelverbindungen, unter denen solche mit zahlreichen kondensierten aromatischen Ringen mit Seitenketten und phenolischen Hydroxylgruppen überwiegen. Nur rd. 10 % der Kohle besteht aus freiem Kohlenstoff. Die elementare Zusammensetzung der Kohlen ist sehr unterschiedlich. Braunkohlen unterscheiden sich z. B. wesentlich von den zahlreichen unterschiedlichen Sorten der Steinkohlen. Während eine typische Braunkohle ohne Asche und Wasser 74 % Kohlenstoff, 5 % Wasserstoff und 21 % Sauerstoff enthält, besteht eine typische Steinkohle aus 90 % Kohlenstoff, 5 % Wasserstoff und 5 % Sauerstoff. Die durchschnittlichen Heizwerte der Kohle liegen zwischen 3000 bis 8000 kcal/kg.

Die Kohle kann je nach Vorkommen im Tagebau gewonnen werden, wenn eine nur dünne Gesteinsschicht darüber lagert (die meisten Braunkohlefelder werden im Tagebau erschlossen, die größten Felder bedeckten Flächen von nahezu 20 000 km²), sehr viele Kohlevorkommen müssen jedoch in größeren Tiefen im Untertagebau erschlossen und genutzt werden (in den USA etwa 60 m Tiefe, in Deutschland im Mittel 760 m).

An die Gewinnung der Kohle schließt sich meist noch am Förderort eine mechanische Veredelung in Form einer Aufbereitung an. Ihr Ziel ist die Gewinnung möglichst aschearmer Kohle in festgesetzten Größenklassen. Die gebräuchlichste und älteste Methode ist die Aufbereitung mit Hilfe der Setzmaschinen (Naßaufbereitung). Die Kohlenstücke über 80 mm, die etwa 10 bis 16 % der geförderten Kohle ausmachen, werden von Hand auf dem Leseband vom tauben Gestein befreit, während die übrige Kohle der Kohlenwäsche zugeführt wird. Dabei wird die grobe Kohle zwischen 10 und 80 mm *(Nüsse, Nußkohle)* von der *Feinkohle* (bis 10 mm) getrennt und beide Kornklassen werden in verschiedenen Waschanlagen weiterbehandelt. Die Abb. zeigt schematisch den Gang der Kohleaufbereitung für Ruhrkohle (Steinkohle). Vom Förderschacht gelangt die Kohle über einen Kreiselkipper auf ein Klassiersieb, das die Trennung in Stückkohle (über 80 mm) und Rohkohle (unter 80 mm) vornimmt. Die Stückkohle geht über ein Leseband und wird gereinigt und verladen, die Rohkohle gelangt aus dem Zwischenbunker über ein Vorklassiersieb, das die Trennung in Nußkohle und Feinkohle vornimmt, in die Wäsche. Die Nußkohle wird in den Grobkornsetzmaschinen vom tauben Gestein befreit und gelangt auf das Nachklassiersieb, wo sie in unterschiedliche Größenklassen (Nuß I bis IV) geschieden wird. Die verschiedenen Nußsorten werden getrennten Verladebunkern zugeführt. Die Feinkohle gelangt über die Feinkornsetzmaschinen in die Feinkohlenbunker und wird entweder als Feinkohle verkauft oder weiter aufbereitet (s. Kohleveredelung S. 76 ff.). — Die Aufbereitung von Braunkohlen geschieht nach denselben Größenklassen und in der gleichen Weise.

Kohle ist ein Hauptstoff der chemischen Industrie und der Schwerindustrie. Aus Kohle werden Tausende von Chemikalien, Rohstoffen und Energiestoffen gewonnen.



Schema der Steinkohlenaufbereitung bei Ruhrkohle



KOHLEVEREDELUNG I
(THERMISCHE VERFAHREN)

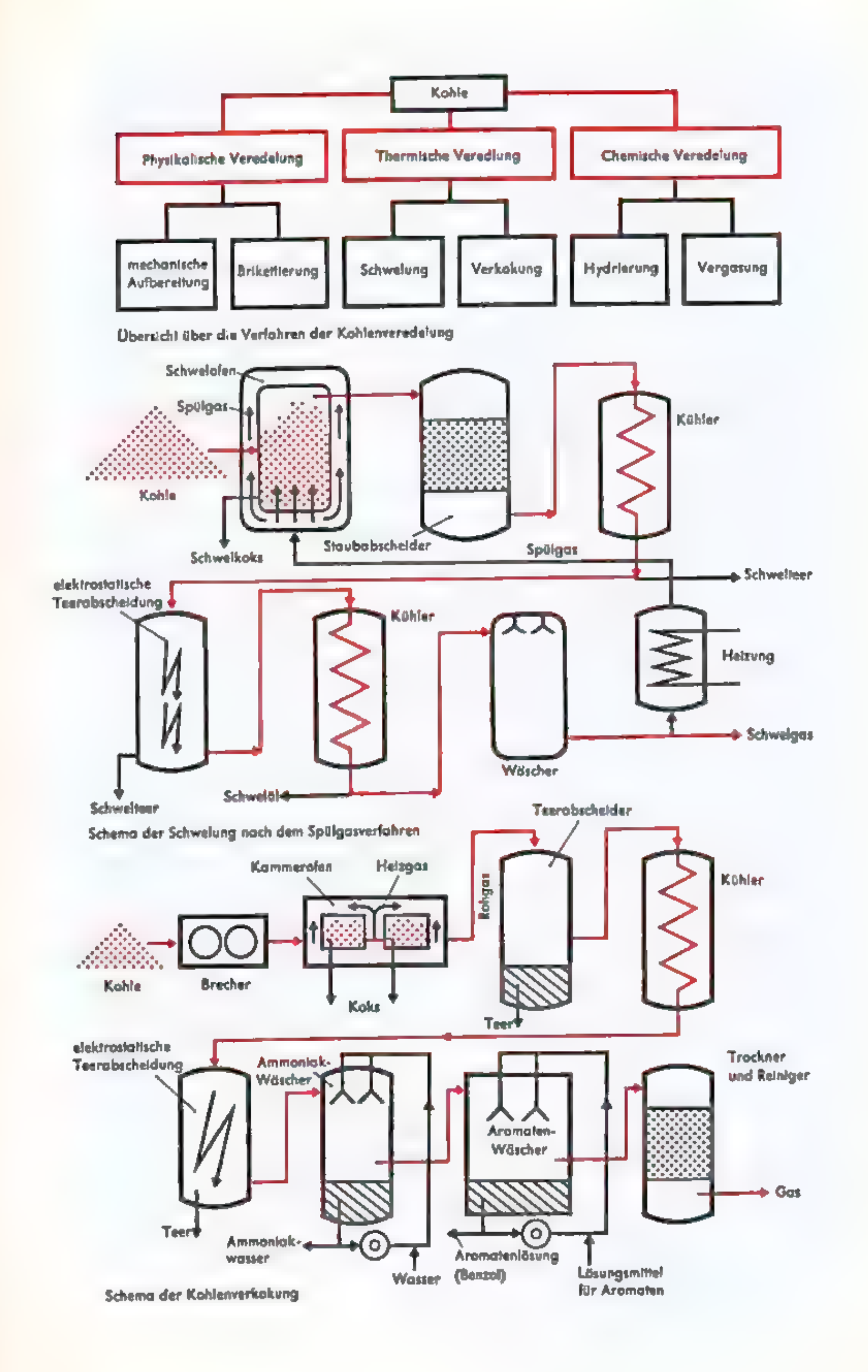
Als *Schwelen (Tieftemperaturentgasung)* bezeichnet man das Erhitzen bituminöser oder kohlehaltiger Brennstoffe unter Sauerstoffausschluß bei Temperaturen von 450 bis 600° C. Dabei werden die flüssigen, kondensierbaren Kohlenwasserstoffe vollständig aus der Kohle entfernt unter Bildung von Schwelteer, Schwelöl, Wasser und Schwelgas. Als Rückstand verbleibt der feste Schwelkoks. Je nach Ausführung des Schwelvorgangs lassen sich mehrere Verfahren unterscheiden. Beim *Heizflächenschwelverfahren* wird die Wärme indirekt über metallische oder keramische Wände übertragen, es lassen sich dabei alle Kohlearten verarbeiten. Das *Lurgi-Spülgasverfahren*, das unter Einwirkung eines heißen, mit der Kohle nicht reagierenden Gases verläuft, erfordert stückiges Gut, die Schwelprodukte müssen außerdem leicht vom Spülgas abtrennbar sein. Eine direkte Wärmeübertragung erfolgt auch beim *Wirbelschichtverfahren*. Als Schwelgut dient feinkörnige, nicht zusammenbackende Kohle, es wird mit kurzen Schwelzeiten (1 Minute) gearbeitet.

Der beim Schwelen von Steinkohle erhältliche *Steinkohlenschwelkoks* ist reaktionsfähiger als das bei der Verkokung anfallende Produkt, er wird als Brennstoff und als Reduktionsmittel bei der Gewinnung von Metallen verwendet. Der *Braunkohlenschwelkoks* ist ebenfalls sehr reaktionsfähig, er besitzt einen hohen Heizwert (bis 7000 kcal/kg) und verbrennt fast ohne Rauchentwicklung. Er findet Verwendung als Hausbrand und zur Energieerzeugung.

Das entstehende *Schwelwasser* wurde früher als unerwünschtes Nebenprodukt betrachtet, wegen seines hohen Gehaltes an Phenolen dient es heute als Rohstoff für die Gewinnung vieler, auf Phenolen basierender Verbindungen. Die Zusammensetzung des beim Schwelen anfallenden *Schwelgases* hängt vom jeweiligen Verfahren ab, Braunkohlenschwelgas nach dem Spülgasverfahren besteht aus 19 Vol.-% CO_2 und H_2S, 11 Vol.-% Methan und 11 Vol.-% Wasserstoff (Heizwert 1720 kcal/m³), Steinkohlenschwelgas setzt sich zusammen aus 5—10 Vol.-% CO_2, 10—18 Vol.-% Methan und 20—30 Vol.-% Wasserstoff (Heizwert 2200 bis 2700 kcal/m³).

Als *Verkokung* bezeichnet man die Umsetzung kohlehaltiger Produkte unter Luftabschluß bei Temperaturen oberhalb 900° C *(Hochtemperaturentgasung, trockene Destillation)*. Die Verkokung von Braunkohle (in Form von Briketts) erfolgt bei einer Temperatur von 950—1100° C in Vertikalkammeröfen, der anfallende Koks wird zur Herstellung von Karbid verwendet. Bei der Verkokung von Steinkohle entstehen Koks (68—85 %), Teer (6,2—4 %), Ammoniak (0,15—0,35 %), aromatische Kohlenwasserstoffe (0,45—1,4 %) und Gas. Eine Temperaturerhöhung führt zur Verminderung der Teer- und Koksausbeute und zur Erhöhung der Ausbeute an Leichtöl und Gas, wobei jedoch der Heizwert der letzteren Produkte sinkt. Bei Beginn der Verkokung werden zunächst bis etwa 200° C die locker gebundenen Adsorbate (H_2O, CO_2, CH_4) ausgetrieben, bei weiterer Temperatursteigerung verläuft bis 400° C die Vorentgasung unter Kohlezersetzung und Bildung von CO, CO_2 und H_2O. Das bis 450° C entwickelte Gas enthält Wasserstoff sowie aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe (Primärgase). Der nichtflüchtige Rückstand verfestigt sich (Halbkoksbildung), bei weiterer Temperatursteigerung wandeln sich die Primärgase zu Sekundärprodukten um, es setzt eine erhöhte Methanbildung ein, gleichzeitig entstehen Naphthene, Aromaten und es beginnt die Bildung von *Hochtemperaturkoks* und *Hochtemperaturteer* unter Abspaltung von Ammoniak, Schwefelwasserstoff und Blausäure.

Die zur Verkokung eingesetzten Öfen sind etwa 12 m lang bei einer Höhe von 4 m und einer Kammerbreite von 35—40 cm. Zwischen den senkrechten, aus Silicasteinen gemauerten Heizwänden befinden sich die Heizzüge.



Übersicht über die Verfahren der Kohlenveredelung

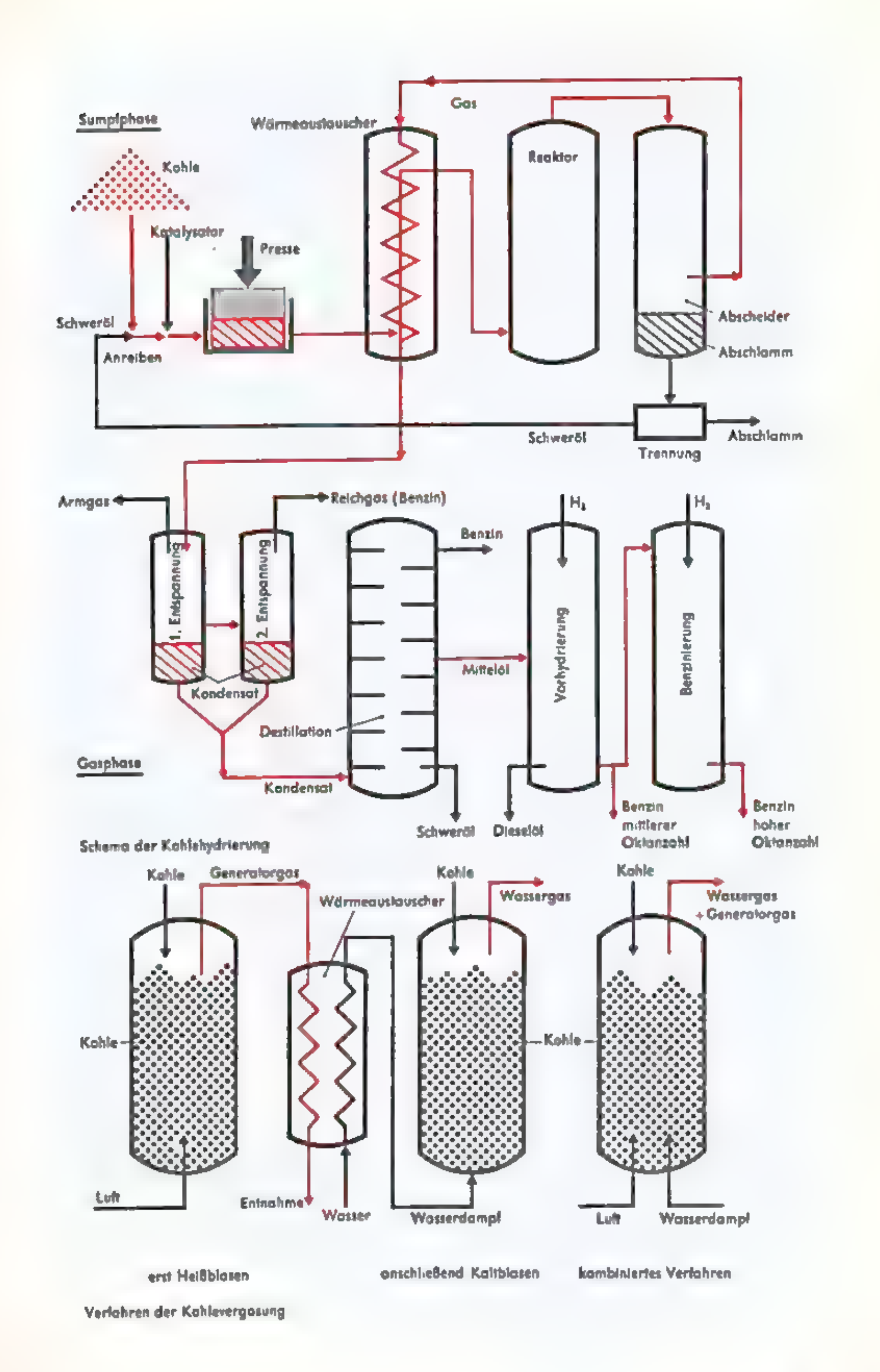
Schema der Schwelung nach dem Spülgasverfahren

Schema der Kohlenverkokung

KOHLEVEREDELUNG II
(CHEMISCHE VERFAHREN)

Bei der Durchführung der Kohlehydrierung lassen sich zwei Teilbereiche unterscheiden. Der Hauptteil der chemischen Prozesse vollzieht sich in der sogenannten *Sumpfphase*. Hier wird die feinverteilte Rohkohle mit Anreiböl (Schweröl) zu einem pumpfähigen Material vermengt. Anschließend wird der Katalysator zugesetzt. Bei der Hydrierung von Braun- und Steinkohle bei Drücken bis 700 at finden als Katalysatoren Luxmasse (aus der Aluminiumgewinnung stammende Eisenhydroxide) oder Raseneisenerz (natürlich vorkommendes Eisenmineral) Verwendung. Für die Hydrierung von Steinkohle bei 300 at wird Zinnoxalat verwendet. Die Reaktionstemperatur liegt bei 450—500° C. Die Reaktionsprodukte werden im Heißabscheider vom anfallenden Abschlamm getrennt, der zur Gewinnung des für die Aufbereitung notwendigen Schweröls verwendet wird. Die leichteren Öle und die gasförmigen Bestandteile werden nach Passieren von Wärmeaustauschern in zwei Stufen entspannt, wobei ein wasserstoffreiches *Armgas* und ein *Reichgas* mit einem hohen Anteil an niederen Kohlenwasserstoffen anfallen. Das gleichzeitig entstehende Kondensat wird durch Destillation in Benzin, Mittelöl und Schweröl getrennt. Das Schweröl dient zur Aufbereitung der Kohle für die Sumpfphase, das Mittelöl wird in der sogenannten *Gasphase* der Gasphasenhydrierung unterworfen. Im 1. Schritt der Gasphasenhydrierung *(Vorhydrierung* bei 300 at, 350—450° C, mit Wolframsulfid-Tonerde-Katalysatoren) werden die störenden Sauerstoff-, Schwefel- und Stickstoffanteile durch Bildung flüchtiger Verbindungen beseitigt, gleichzeitig gewinnt man ein Benzin mittlerer Oktanzahl, das nicht umgesetzte Mittelöl wird als hochwertiges Dieselöl verwertet. Im 2. Schritt der Hydrierung, der als *Benzinierung* bezeichnet wird und bei 400° C und 200—300 at mit Wolframsulfid-Bleicherde-Katalysatoren verläuft, wird ein Teil des im 1. Schritt angefallenen Benzins in ein Benzin hoher Oktanzahl umgewandelt.

Als *Kohlevergasung* bezeichnet man die Umsetzung fester Brennstoffe (Kohle, Koks) mit einem Vergasungsmittel. Die Vergasung dient der Gewinnung von Brenn- und Synthesegasen, sie läßt sich nach mehreren Verfahren durchführen. Gebräuchlich sind die Vergasung mit ruhender Brennstoffschüttung in Drehrostgeneratoren (mit fester Ascheaustragung) oder Abstichgeneratoren (mit flüssigem Ascheanfall), die Vergasung in der Wirbelschicht oder in der Schwebe. Wird die Vergasung unter erhöhtem Druck durchgeführt, so steigt die Ausbeute an gasförmigen Bestandteilen. Die Vergasung bei ruhender Schüttung unter Druck liefert ein stark methanhaltiges Gas, das wegen seines hohen Heizwertes als Ferngas eingesetzt wird. Bei der Vergasung in der Wirbelschicht entsteht methanfreies Gas. Die Vergasung läßt sich entweder mit Luft oder Wasserdampf durchführen. Bei der Verwendung von Luft bildet sich das sogenannte *Schwachgas* oder *Generatorgas*, dessen Heizwert je nach Verfahren zwischen 900 und 1700 kcal/m³ liegt. Dabei entsteht beim Einblasen der Luft an den unteren Kohlenschichten zunächst unter Wärmeentwicklung Kohlendioxid, das von den darüberliegenden Kohleschichten unter Wärmeverbrauch zu Kohlenmonoxid reduziert wird. Die durchschnittliche Zusammensetzung des Gases liegt bei 2—7 % CO_2, 11—18 % H_2, 21—30 % CO, 45—56 % N_2 und geringen Mengen höherer Kohlenwasserstoffe. Verwendung findet das Generatorgas v. a. als Heizgas. Durch Vergasen mit Wasserdampf wird das *Wassergas* mit einem Heizwert von 2000 bis 3000 kcal/m³ gewonnen, es besteht hauptsächlich aus Kohlenmonoxid, Wasserstoff und geringen Mengen Stickstoff. Da die Vergasung mit Wasserdampf unter Wärmeverbrauch verläuft, wird die Gewinnung von Wassergas meist mit der Gewinnung von Generatorgas kombiniert, wobei die Koksfüllung zunächst durch *Heißblasen* mit Luft aufgeheizt wird (Generatorgas).



Schema der Kohlehydrierung

Verfahren der Kohlevergasung

ERDÖLVERARBEITUNG

Erdöl ist ein aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen bestehendes, mehr oder weniger flüssiges Gemenge, das als Rohstoff in natürlichen Lagerstätten auftritt. Die Analyse verschiedener Erdölsorten ergibt als Hauptbestandteile etwa 80,4 bis 87 % Kohlenstoff, 9,6 bis 13,8 % Wasserstoff, 0 bis 2 % Stickstoff sowie Spuren weiterer Elemente. Der Charakter des Erdöls wird v. a. durch die jeweils vorherrschende Kohenwasserstoffgruppe bestimmt. Es können u. a. *Paraffine* (gesättigte, langkettige oder verzweigte Kohlenwasserstoffe) *Aromaten* (ungesättigte, cyclische Verbindungen) oder *Naphthene* (gesättigte, cyclische Verbindungen) auftreten. Die Verarbeitung des Erdöls dient der Gewinnung von Primärprodukten wie Treibstoffen, Schmier- und Heizölen und deren Weiterverarbeitung auf spezielle Produkte.

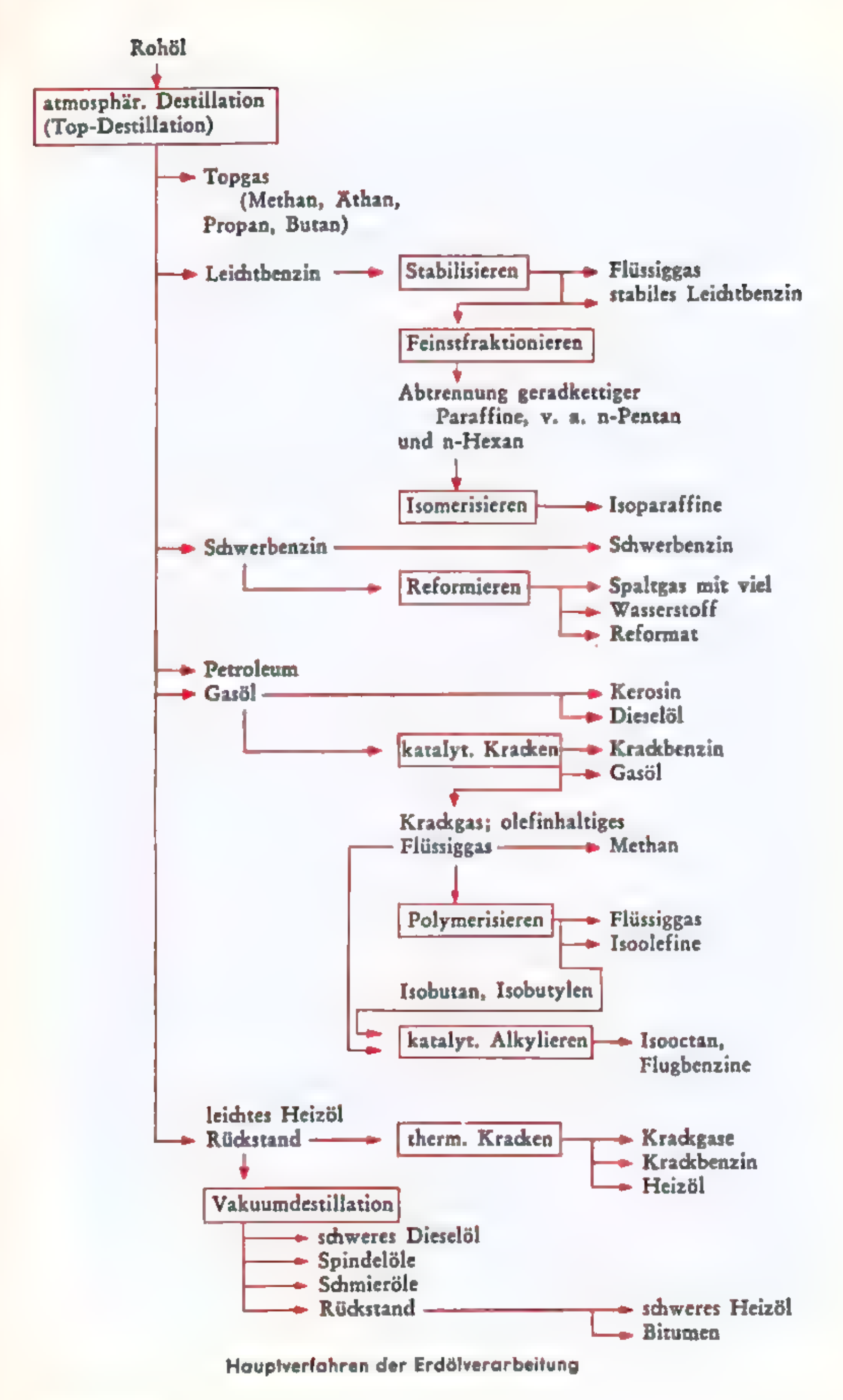
Die ersten Verarbeitungsschritte, denen das geförderte Erdöl unterworfen wird, sind Reinigungsprozesse wie Abfiltern von Sand oder Schlamm, Entfernen des Wassers, Abtrennen gelöster Salze und Auswaschen von Schwefelverbindungen mit Hilfe von Triäthanolaminlösungen. Sodann gelangt das Rohöl in die Raffinerie zur Aufbereitung. Die Zerlegung des Erdöls beginnt mit einer sogenannten *Topdestillation*, das ist eine Destillation unter atmosphärischem Druck, die zur Spaltung des Erdöls in Fraktionen verschiedener Siedebereiche dient. Aus dem Destillationsturm werden dabei einzelne Seitenströme unterschiedlicher Siedetemperatur abgezogen. An der Spitze der Destillationskolonne entweichen die *Topgase* (Methan, Äthan, Propan, Butan). Bei einer Temperatur von 100° C werden das *Leichtbenzin*, bei 200° C das *Schwerbenzin*, bei 240° C das *Petroleum*, und bei Temperaturen bis 380° C das *Gasöl* gewonnen. Der unter normalem Druck nicht weiter zerlegbare *Toprückstand* wird entweder durch thermisches Kracken (s. S. 82) oder durch eine *Vakuumdestillation*, die der Gewinnung von Diesel-, Spindel- und Schmierölen dient, weiter zerlegt. Der auch durch Vakuumdestillation nicht auftrennbare Rückstand dient zur Gewinnung von Bitumen oder schweren Heizölen.

Alle Destillate, einschließlich der Topgase, müssen vor der Abgabe an den Verbraucher, vielfach auch vor der weiteren Verarbeitung, einer Nachbehandlung *(Raffination)* unterworfen werden. Dies geschieht, um den Marktanforderungen hinsichtlich Lagerstabilität, Geruch, Farbe und dem jeweiligen Verwendungszweck gerecht zu werden, jedoch auch um korrosiv wirkende Komponenten und Katalysatorgifte zu entfernen.

Durch eine *Feinstfraktionierung* des Leichtbenzins (Auftrennung in Fraktionen mit eng begrenzten Siedebereichen) läßt sich eine Abtrennung der geradkettigen Paraffine (n-Paraffine, v. a. n-Pentan und n-Hexan) erreichen, die infolge ihrer niedrigen Oktanzahlen als Treibstoffe nicht geeignet sind. Diese geradkettigen Paraffine lassen sich durch eine *Isomerisierung* (Umlagerung der langen Ketten in kurze mit Verzweigungen) in Isoparaffine (i-Paraffine) mit hohen Oktanzahlen umwandeln.

Erdöle mit einem hohen Gehalt an Naphthenen sowie die Schwerbenzinfraktion lassen sich durch Reformieren (s. S. 84) in aromatenreiche Motorbenzine *(Reformate)* überführen. Als Nebenprodukte treten Flüssiggase und wasserstoffreiche, zu Synthesen geeignete Spaltgase auf.

Eine erneute Auftrennung der Gasölfraktion liefert *Kerosin* (Siedepunkt 175 bis 280° C) und *Dieselöl* (Siedepunkt 275 bis 380° C). Ein anderer Teil der Gasölfraktion kann durch Kracken in niedrigsiedende Kohlenwasserstoffe umgewandelt werden. Durch eine im Anschluß an den Krackvorgang durchgeführte, katalytisch gesteuerte *Polymerisation* (Aufbau größerer Moleküle aus kleineren) lassen sich Kohlenwasserstoffe bestimmter Strukturen aufbauen. Die Polymerisation spielt v. a. eine Rolle bei der Gewinnung der Isoolefine (i-Olefine, ungesättigte, verzweigte Kohlenwasserstoffe).



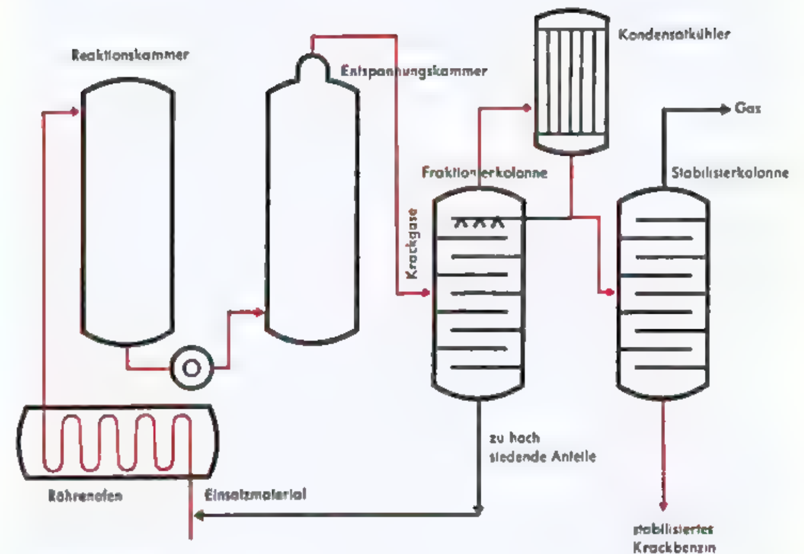
Hauptverfahren der Erdölverarbeitung

KRACKEN

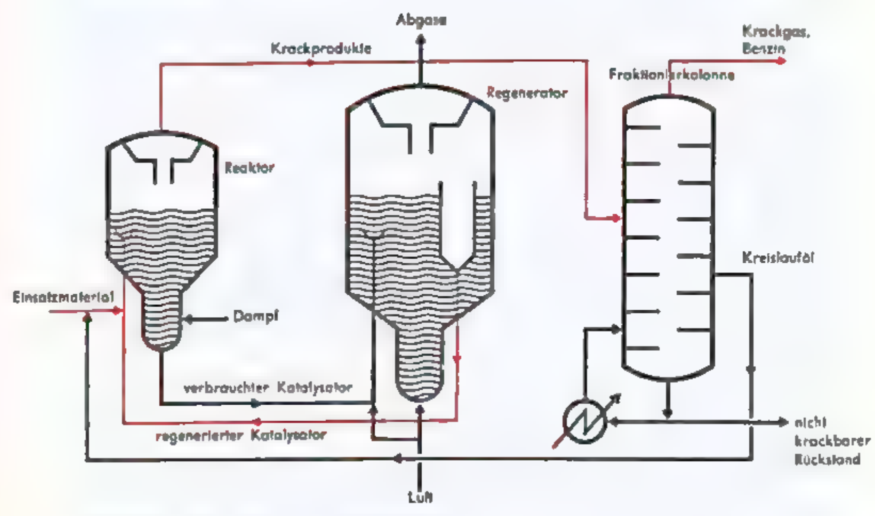
Den Qualitätsanforderungen der immer stärker zunehmenden Motorisierung sind die bei der Topdestillation gewonnenen Benzine (sogenannte *straight-run-Benzine)* nicht mehr gewachsen. Es wurden deshalb mehrere Verfahren entwickelt, um die Ausbeute an qualitativ höherwertigen Motorbenzinen zu steigern. Eines dieser Verfahren ist das Kracken, das sich sowohl mit der Methode der thermischen Spaltung (thermisches Kracken) als auch auf katalytischem Wege (katalytisches Kracken) durchführen läßt. Das für den Krackprozeß verwendete Produkt (Krackstock) kann der Toprückstand sein, d. h. derjenige Teil der Topdestillation, der sich unter normalem Druck nicht mehr weiter zerlegen läßt. Aber auch Rohöl und die Destillationsfraktionen mit einem Siedebeginn von mehr als 260° C sind zum Kracken geeignet.

Thermisches Kracken: Beim Kracken bei Temperaturen von wenig über 400° C werden in erster Linie die Bindungen höhermolekularer Verbindungen geöffnet, es treten keine niedrigsiedenden Bestandteile auf. Hochviskose Rückstände (schwere Erdölfraktionen) werden auf diese Weise leichtflüssiger, man erhält leichtere Heizöle. Bei Temperaturerhöhung setzt eine Wasserstoffabspaltung ein, es entstehen ungesättigte Kohlenwasserstoffe, der Anteil niedrigsiedender Produkte steigt. Durch Isomerisierung bilden sich verzweigte Kohlenwasserstoffe. Oberhalb von 550° C entstehen Aromaten, bei 800° C setzt in zunehmendem Maße Koksbildung ein. Durch Druckänderung lassen sich die Produktgrenzen verschieben. Thermisches Kracken wird sowohl in der Flüssig- als auch in der Dampfphase durchgeführt. Dabei liegt der Druck für die Flüssigphase bei 50 bis 70 at, für die Dampfphase zwischen 5 und 15 at. Im normalen Verfahrensablauf wird das einzusetzende Produkt in einem Röhrenofen auf die erforderliche Temperatur gebracht. In der sich anschließenden Reaktionskammer erfolgt die der gewählten Verweilzeit entsprechende Umsetzung. Anschließend wird das Spaltgemisch in einer Reaktionskammer schlagartig entspannt, um jede weitere Reaktion zu unterbinden. Ein Reaktionsabbruch läßt sich auch durch Einspritzen kalten Einsatz- oder Kreislaufproduktes erzielen *(Quenching).* Die Reaktionsprodukte werden in einer Kolonne in ihre Bestandteile zerlegt, das Benzin wird anschließend in einer weiteren Kolonne stabilisiert.

Katalytisches Kracken: Die katalytische Spaltung wird bei niedrigen Drücken und Temperaturen von etwa 550° C in der Dampfphase durchgeführt. Einsatzmaterialien sind Rohöldestillate verschiedener Siedebereiche. Die katalytischen Verfahren liefern vornehmlich niedermolekulare Aromaten, Isoparaffine und Naphthene, in geringerem Maße auch Olefine. Es entstehen also qualitativ hochwertige Benzine. Als Katalysatoren lassen sich aktivierte natürliche Tone, synthetische saure Aluminiumhydrosilicate, Magnesium- und Molybdänsilicate verwenden. Die leichten Spaltprodukte werden fortlaufend aus dem Reaktor abgezogen, die schweren sowie sich bildender Koks (der in geringeren Mengen als beim thermischen Kracken anfällt) lagern sich auf dem Katalysator ab und führen zu dessen Inaktivierung. Deshalb gelangen die Katalysatoren kontinuierlich in einen Regenerator, wo sie mit Luft abgebrannt werden um anschließend in den Reaktor zurückgeführt zu werden. Die Spaltprodukte werden fraktioniert, wobei Teile, die in ihrem Siedebereich dem eingesetzten Material entsprechen, wieder dem Reaktor zugeführt werden. Hinsichtlich der Katalysatoranwendung unterscheidet man die bewegte Schüttung des Katalysators *(moved bed, Wanderbett)* und das *Fließbett-* oder *Wirbelschichtverfahren (fluid bed).* Beim letzteren Verfahren wird das einzusetzende Material zusammen mit den feinkörnigen Katalysatorteilchen über eine Aufheizzone in den Reaktor eingebracht. Die verdampfenden Produkte versetzen den festen Katalysator in wallende Bewegung, was zur Ausbildung des Wirbelbetts mit einer deutlich abgegrenzten Oberfläche führt. In diesem Bett spielen sich die Krackreaktionen ab.



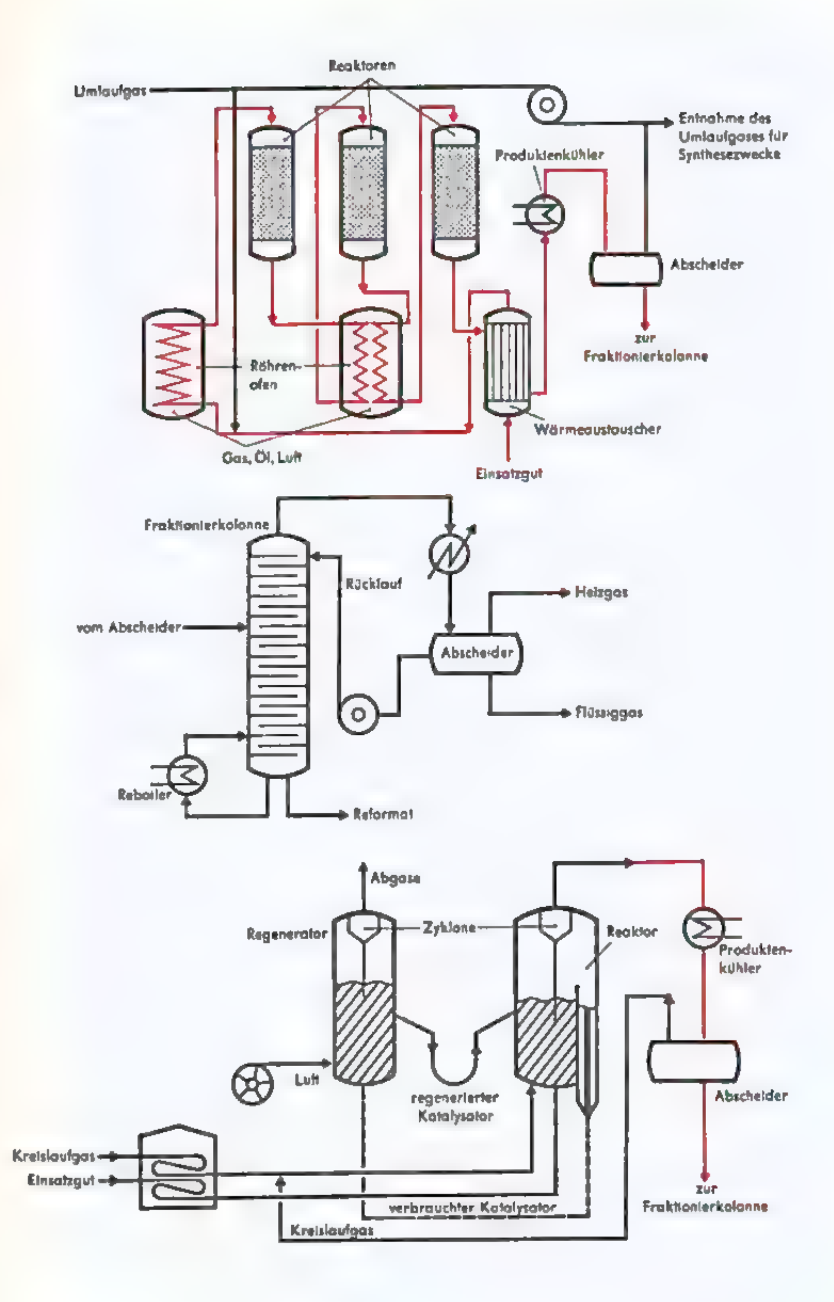
Thermisches Kracken



Katalytisches Kracken (Kracken in der Wirbelschicht)

REFORMIEREN

Das Reformieren dient der Umwandlung der als Benzin nicht verwendbaren Destillationsfraktionen in wertvolle Flug- und Motorbenzine *(Reformatbenzine)*. Sowohl naphthenische wie paraffinische Schwerbenzine, aber auch Destillationsfraktionen eng begrenzter Siedebereiche wie etwa n-Hexan oder n-Heptan bilden das Einsatzgut. Durch das Reformieren läßt sich ein Benzin hoher Oktanzahl (90—100) gewinnen. Das Einsatzgut sollte, um einer Vergiftung des Katalysators vorzubeugen, weitgehend entschwefelt sein.
Das früher häufig angewandte *thermische Reformieren* spielt heute nur noch eine untergeordnete Rolle, die meisten Verfahren verlaufen heute katalytisch, da sich dabei die Produktausbeute besser regeln läßt. Beim *katalytischen Reformieren* lassen sich v. a. zwei Verfahren unterscheiden, die durch eine unterschiedliche Anordnung des Katalysators bedingt sind. Beim Reformieren nach dem *Festbettverfahren* wird ein feinkörniger, fest im Reaktor auf Trägermaterial angebrachter Platinkatalysator verwendet *(Platforming* aus engl. *plat*inum *reforming* process). Beim Reformieren nach dem *Wirbelschichtverfahren* (Fluid-Hydroforming, Hyperforming) besteht der Katalysator aus feinkörnigen Molybdän- und Aluminiumoxidteilchen oder Gemischen aus Kobalt, Molybdän und Aluminiumoxid, die von unten her vom Einsatzgut durchströmt werden und den Katalysator in wirbelnde Bewegung versetzen.
Die Reaktion vollzieht sich bei Drücken zwischen 20 und 50 at bei Temperaturen von mehr als 500° C. Neben der Aromatisierung des Einsatzgutes (Dehydrierung) verlaufen auch Cyclisierungs- und Isomerisierungsreaktionen, d. h. die Umwandlung geradkettiger Kohlenwasserstoffe in ringförmige oder die Umlagerung gerader Ketten in verzweigte.
Das Festbettverfahren arbeitet nach folgendem Prinzip: In einem Wärmeaustauscher wird das Einsatzbenzin vorgewärmt, mit wasserstoffhaltigem Umlaufgas (Kreislaufgas) gemischt und im Röhrenofen auf die Reaktionstemperatur erhitzt. Die Reformierung verläuft in drei hintereinander geschalteten Reaktoren. Da beim Reformiervorgang Wärme verbraucht wird, heizt man das Umsetzungsgut zwischen den Reaktoren jeweils wieder auf. In einem nachgeschalteten Abscheider trennt sich das flüssige Produkt, das zuvor in einem Wärmeaustauscher und einem Kühler abgekühlt wurde von dem wasserstoffhaltigen Gas, das teils in die Reaktoren zurückgeleitet wird, teils für andere Verwendungszwecke entnommen wird. Die Aufarbeitung des Produktes erfolgt in einer Fraktionierkolonne und durch selektive Extraktion. Aromatenarme Teile des Reaktionsproduktes werden wieder in den Röhrenofen zurückgeleitet. Durch einen nachgeschalteten Abscheider werden die leichtsiedenden Anteile in Heizgase und Flüssiggase getrennt. Zur Regenerierung des durch Verkokung und Ablagerung fester Reaktionsprodukte inaktivierten Katalysators wird ein Reservereaktor (Swing-Reaktor) eingesetzt, in dem der Katalysator durch Abbrennen mit Luft wieder regeneriert wird. Soll die Oktanzahl gesteigert werden, so sinkt die Ausbeute an hochwertigem Benzin, da verschärfte Reaktionsbedingungen zu einer erhöhten Bildung von Koks führen. Der Verkokung wird durch das Umlaufgas mit relativ hohem Wasserstoffgehalt (60 bis 80 Volumprozent) entgegengewirkt, das eine Hydrierung des sich bildenden Kokses zu flüchtigen Kohlenwasserstoffen bewirkt.
Die Anordnung von Reaktor und Regenerator beim Reformieren in der Wirbelschicht entspricht im wesentlichen der Anordnung beim katalytischen Kracken in der Wirbelschicht (s. S. 82). Auch hier wird der Katalysator kontinuierlich aus dem Reaktor abgezogen und in einem Regenerator durch Abbrennen mit Luft vom Koks und anderen festen Bestandteilen gereinigt. Die durch das Reformieren in der Wirbelschicht erhaltenen Produkte werden in gleicher Weise wie beim Reformieren im Festbett nachbehandelt.



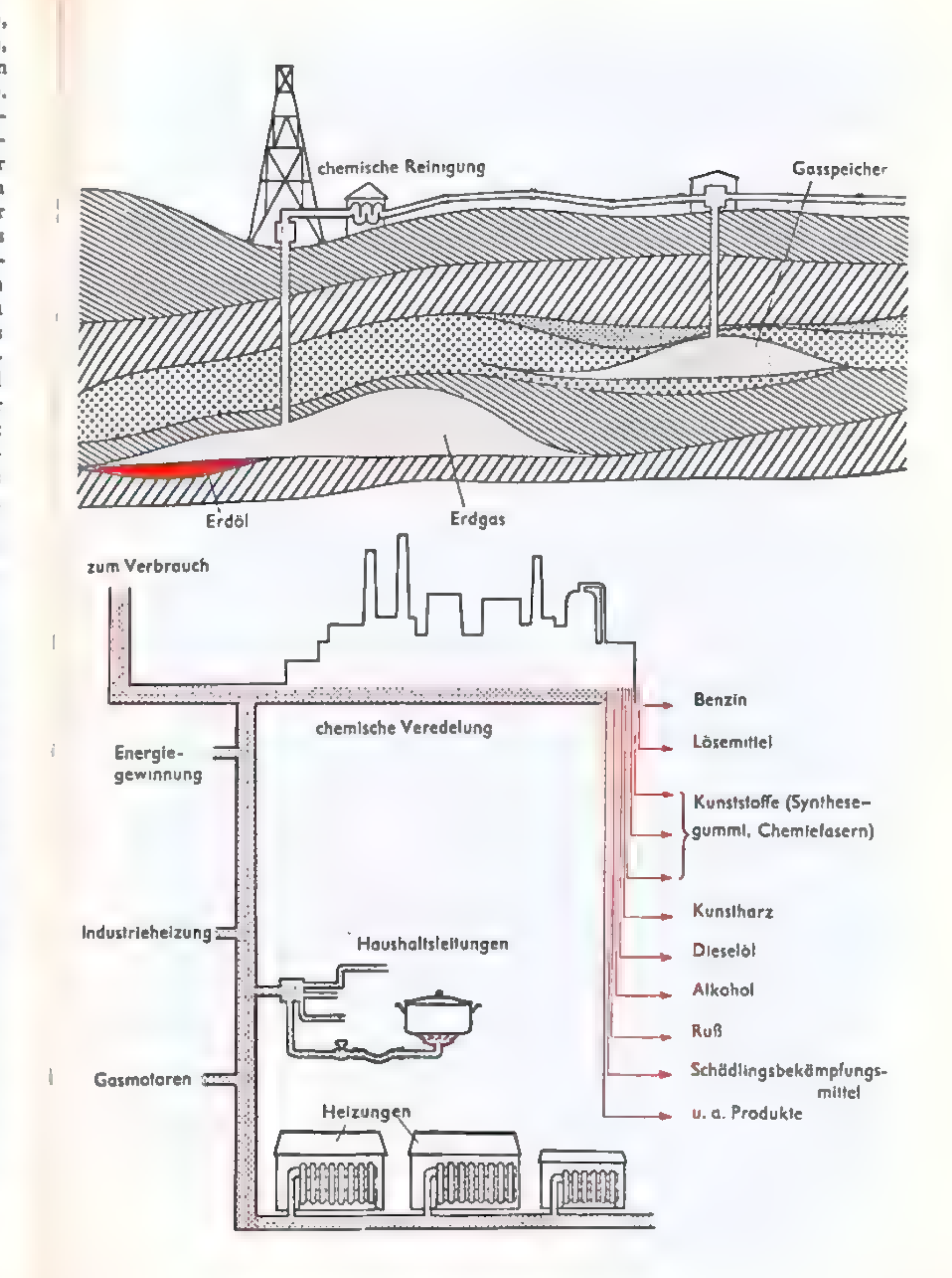
ERDGAS

Das Erdgas ist ein Gasgemisch, sein Hauptbestandteil ist das Methan (80—90 %), daneben enthält es jedoch auch gesättigte Kohlenwasserstoffe wie Äthan, Propan, Butan, Pentan sowie Kohlendioxid, Schwefel- und Stickstoffverbindungen, in einigen Fällen sogar beträchtliche Mengen an Edelgasen (Helium, Neon, Argon). Man unterscheidet zwischen trockenem und nassem Erdgas. Von *trockenem Erdgas* spricht man bei fast ausschließlichem Methangehalt, sein Heizwert liegt zwischen 8000 und 9000 kcal/m³. *Nasse Erdgase* enthalten größere Mengen höherer Kohlenwasserstoffe. Trockene Erdgase fallen v. a. bei der Gewinnung aus reinen Gaslagerstätten aus nicht zu großen Tiefen an. Trockene Erdgase erfordern vor der Weiterverwendung keine besonderen Reinigungsverfahren, lediglich der aus der Lagerstätte stammende Gehalt an Wasserdampf wird entfernt. Nasse Erdgase treten v. a. bei der Gewinnung von Erdgas aus Erdöllagerstätten in größeren Tiefen auf. Der dort herrschende Druck bewirkt den Übergang der höheren Kohlenwasserstoffe in den gasförmigen Zustand. Bei der Förderung des Erdgases und der Entspannung auf atmosphärischen Druck kondensieren diese Kohlenwasserstoffe wieder. Sie werden vor der Verwendung des Erdgases entfernt und dienen v. a. zur Benzingewinnung. Will man eine vollständige Entfernung der höheren Kohlenwasserstoffe erzielen, so wird das geförderte Gas zunächst erneut komprimiert, gekühlt und anschließend entspannt. Die bei der Entspannung auftretende zusätzliche Abkühlung bewirkt eine weitgehende Kondensation des Propans und der höheren Homologen, nur das tiefsiedende Methan und Äthan bleiben gasförmig. Andere Methoden arbeiten mit der Adsorption der schweren Kohlenwasserstoffe an Aktivkohle oder geeigneten Adsorbern. Das anfallende Flüssiggas wird durch destillative Trennung in seine Komponenten zerlegt und gelangt so auf den Markt.

Enthält das geförderte Erdgas außer höheren Kohlenwasserstoffen noch weitere Bestandteile wie Schwefelwasserstoff, Kohlendioxid und Stickstoffverbindungen, erfolgt vor der Abgabe an den Verbraucher eine Reinigung des Erdgases. Das Gas wird durch Waschanlagen unterschiedlicher Zusammensetzung geleitet. Saure Bestandteile werden durch alkalische Lösungen gebunden, oder das Erdgas wird mit Waschflüssigkeiten behandelt, die die unerwünschten und schädlichen Nebenbestandteile herauslösen. Durch anschließendes Erhitzen der Waschflüssigkeiten können die gelösten Bestandteile wieder ausgetrieben werden und das Lösungsmittel erneut in den Kreislauf gebracht werden. Bei größerem Gehalt an Schwefelwasserstoff wird dieser mittels alkalischer Waschlösungen entfernt. Die Aufarbeitung dieser Lösungen liefert einen sehr reinen Schwefel, der sich gut absetzen läßt.

Die heutige Erdgasförderung liefert einen entscheidenden Teil der Energierohstoffe. Ein großer Teil des Erdgases wird über riesige Fernleitungsnetze von den Förderstätten in die Industriezentren geleitet und als Heizgas und Haushaltsgas verwendet, ein Teil wird zur Erzeugung elektrischer Energie verwendet, steigende Bedeutung besitzt das Erdgas auch als Rohstoff der chemischen Industrie zur Gewinnung von Chemiefasern, Kunststoffen, synthetischem Gummi, Kunstharzen, und zur Herstellung vieler Chemikalien wie Alkoholen, Lösungsmitteln, Schädlingsbekämpfungsmitteln, Ruß und vielen anderen Produkten.

Neben den Erdgasquellen, die bei der Erdölförderung auftreten, besitzen die künstlich erbohrten Quellen steigende Bedeutung. Um das gewonnene und notfalls bereits gereinigte Gas speichern zu können, werden ehemalige Gasfelder, deren Vorräte erschöpft sind, als unterirdische Erdgasspeicher verwendet. Das Fassungsvermögen dieser Speicher beträgt in einigen Fällen bis zu 1 Milliarde Kubikmeter.



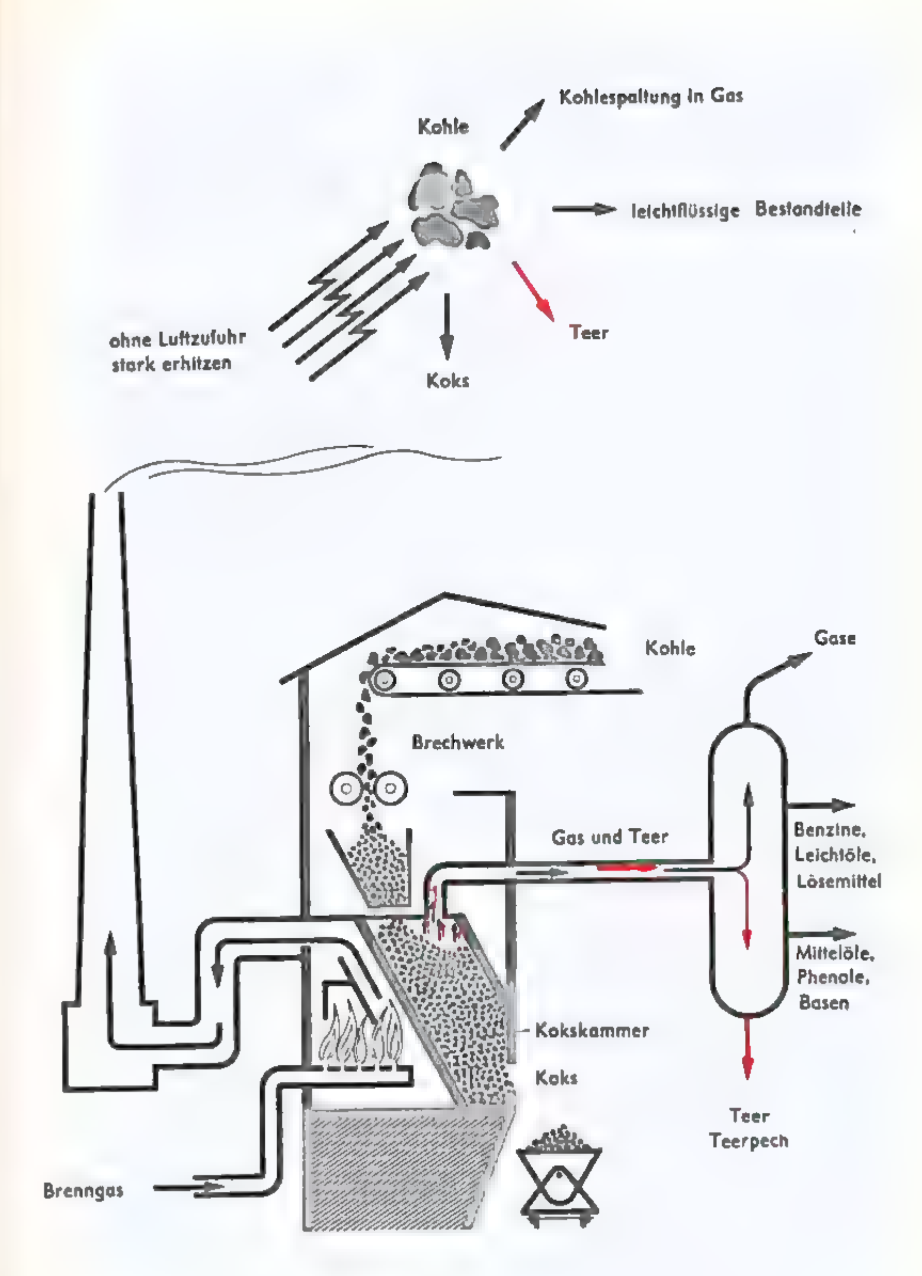
TEER

Teer ist ein flüssiges bis halbfestes, braunes bis tiefschwarzes Zersetzungsprodukt, das bei thermischer Behandlung von Kohle, Holz, Torf, Öl u. ä. entsteht. Bei der Destillation von Teeren fällt *Pech* als Rückstand an (als Pech wird allgemein auch der schmelzbare Rückstand bezeichnet, der bei der Destillation organischer Stoffe anfällt). Nach Art des Rohstoffes werden Steinkohlen-, Braunkohlen-, Holz-, Torf- und Ölteere unterschieden.

Steinkohlenteer, der beim Schwelen (Schwelteer, Urteer) von Steinkohle (s. Kohleveredelung) anfällt, hat bei gleicher Ausgangskohle unterschiedliche Beschaffenheit wegen unterschiedlicher Gewinnungsweisen: Heizflächenschwelteer ist dünnflüssig mit 30 % Pechgehalt, Spülgasteer dickflüssig mit 50 bis 60 % Pech; Schwelteere (Dichte etwa 1 g/cm³) enthalten v. a. Phenole (saure Öle), Naphthene, Paraffine und Olefine sowie geringe Mengen an Aromaten. Hochtemperaturteere (Kokereiteere, Gaswerksteere) entstehen bei der Steinkohlenentgasung, die Dichte beträgt etwa 1,2 g/cm³; die zähflüssige, schwarze Masse besteht vornehmlich aus Aromaten und enthält in geringer Menge Phenole und heterocyclische Verbindungen.

Die Aufbereitung des Steinkohlenteers ist ausgerichtet auf die Isolierung der einzelnen darin enthaltenen Komponenten, deren wichtigste Naphthalin, Phenanthren, Fluoranthren, Pyren, Chrysen, Anthracen und Carbazol sind. Sie werden in der chemischen Industrie zur Herstellung von Farbstoffen, Pharmazeutika, Kunststoffen, Explosivstoffen, Desinfektionsmitteln, Kraftstoffen und Lösungsmitteln benötigt. Die Auftrennung erfolgt destillativ. In einer Entwässerungskolonne werden unter Normaldruck das Ammoniakwasser (bis zu 5 % des Teers) und ein Teil des Leichtöls abgetrennt. Weitere Fraktionen sind Carbolöl, Naphthalinöl, Waschöl (Solvayöl), Anthracenöl; als Rückstand ergibt sich Pech. *Leichtöl* (Siedebereich 70 bis 200° C, etwa 3 % des Teers) enthält v. a. Benzol und seine Homologe, daneben ungesättigte Verbindungen (zur Herstellung von Cumaron-Inden-Harzen), basische Verbindungen (Pyridin, Anilin und deren Homologe) und Phenole. *Carbolöl* (Siedebereich 180 bis 215° C, etwa 10 % des Teers) enthält bis zu 35 % Phenol und höhere Homologe (Teersäuren), die mit Natronlauge abgetrennt werden. Der als Neutralöl verbleibende Anteil (Benzol, Pyridin, Naphthalin) wird beim Leichtöl mit aufgearbeitet. Die Hauptmenge des Naphthalins (etwa 10 %) des Rohteers ist im *Naphthalinöl* enthalten, aus dem Naphthalin durch Kristallisation oder Rektifikation gewonnen wird. Das *Waschöl* siedet bei 230 bis 290° C, es besteht aus Naphthalinhomologen, Diphenyl, Acenaphthen, Fluoren und wird zum Auswaschen von Rohbenzol aus Kokereigasen sowie als Zusatz zu Spezialteeren und *Teeröl* verwendet. Aus dem *Anthracenöl* wird das auskristallisierte Rohanthracen in Zentrifugen abgeschleudert. Aus dem filtrierten Anthracenöl wird Naphthalinwaschöl hergestellt, außerdem werden Imprägnieröle (dazu werden auch die Wasch- und Naphthalinölanteile verwendet) gewonnen, die als Holzschutzmittel dienen. Das zurückbleibende *Pech* mit einem Erweichungspunkt von 60 bis 73° C (etwa 55 % des Teers) wird als Bindemittel für die Herstellung von Briketts und von Kohlenstoffelektroden (Elektrodenpech) verwendet.

Braunkohlenteere sind die bei der Schwelung, Vergasung und Verkokung von Braunkohle anfallenden flüssigen bis wachsartigen Produkte. Die Charakterisierung der bei den verschiedenen Verfahren und unterschiedlichem Rohstoff anfallenden Teere erfolgt durch die Dichte (0,92 bis 0,96 g/cm³), den Gehalt an Paraffin (8 bis 20 %), den Gehalt an sauren Bestandteilen, z. B. Kreosot (9 bis 30 %), den Gehalt an asphaltartigen Stoffen, die nicht in Benzin löslich sind (bis 10 %) und den Gehalt an Asche. Neben dem eigentlichen Teer fallen als teerähnliche Produkte Leicht- und Mittelöl an. Die Aufarbeitung von Braunkohlenteeren ist ausgerichtet auf die Paraffingewinnung und die Kraftstoffherstellung.



ASPHALT

Asphalt ist ein Gemisch aus Bitumen und Mineralstoffen und war bereits im Altertum ein viel verwendeter Baustoff zum Befestigen von Straßen, Wasserrinnen und Uferböschungen, wie auch als Fußbodenbelag in Badezimmern. Man verarbeitete damals natürlich entstandenen Asphalt, dessen Entstehung man sich so vorstellen kann, daß an die Erdoberfläche aufgestiegenes Erdöl sich mit feinen Mineralstoffen (z. B. Flugstaub) vermischte und durch Abdunsten der verdampfbaren Ölbestandteile im Verlaufe langer Zeiten erhärtete.

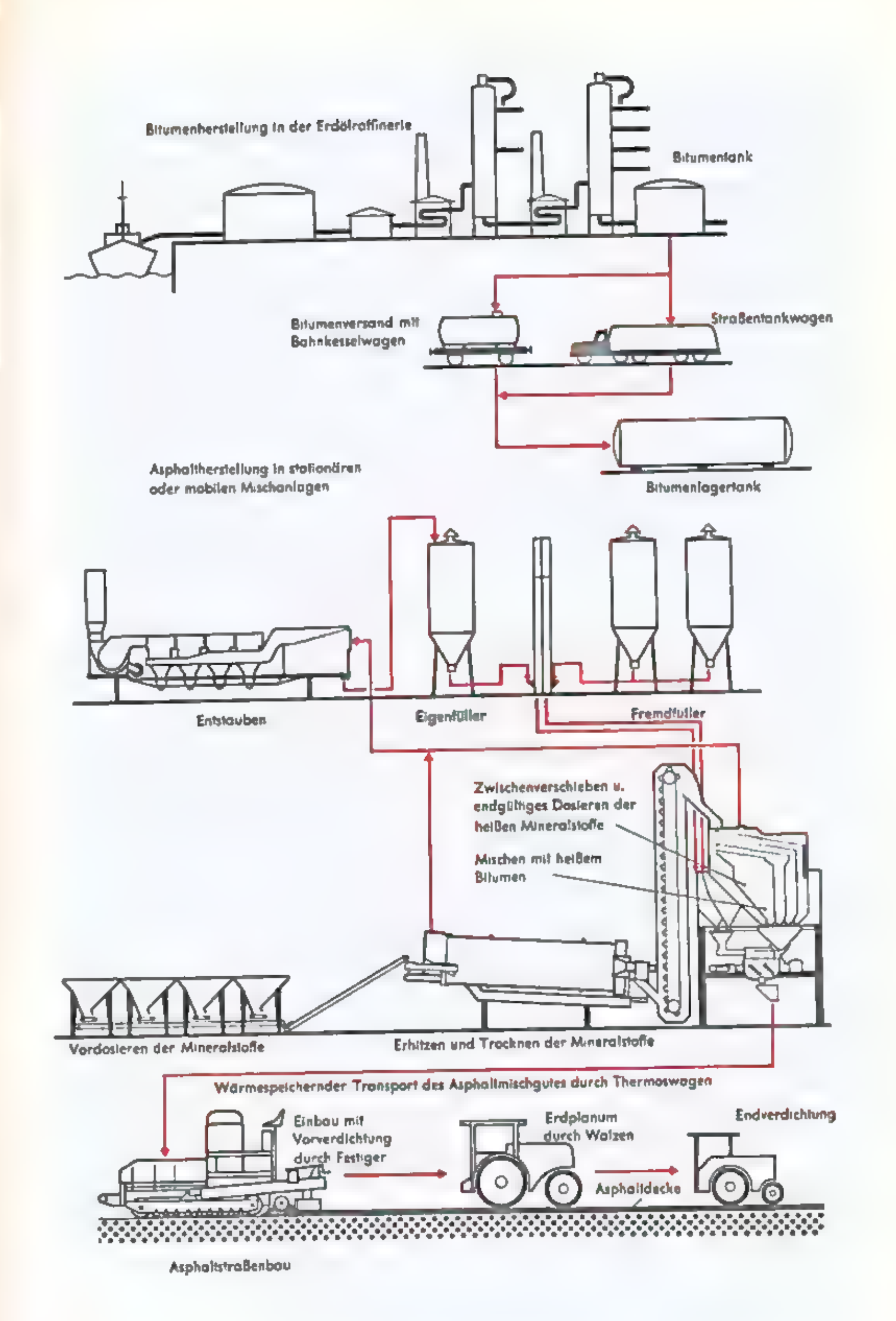
Die heute vor allem für den Straßenbau, aber auch im Wasserbau (Speicherbecken) und Flugplatzbau (Start- und Landebahnen, Rollbahnen) benötigten großen Mengen an Asphalt werden technisch hergestellt. Dies geschieht in stationären Mischwerken oder (z. B. zur Abwicklung umfangreicher Baumaßnahmen) in mobilen Mischanlagen mit derzeitigen Mischleistungen bis zu 300 t/Std. Die Eigenschaften des Asphaltes lassen sich über seine Zusammensetzung den vielseitigen Erfordernissen der zahlreichen Anwendungsgebiete weitgehend anpassen.

Nach der Einbaumethode unterscheidet man Walzasphalt und Gußasphalt. Beiden liegt jedoch das thermoplastische Verhalten des Bitumens zugrunde, das im kalten Zustand fest und elastisch ist, mit zunehmender Temperatur aber alle Aggregatzustände von fest über zähflüssig bis dünnflüssig stufenlos durchläuft. Da Bitumen nur im heißen Zustand dünnflüssig und damit verarbeitbar ist, müssen beide Arten von Asphalt sowohl heiß hergestellt als auch heiß eingebaut werden.

Walzasphalt: Das Bitumen wird in der Erdölraffinerie durch Destillation (Siedetrennung) aus dem Erdöl herausgetrennt, mit isolierten Bahnkesselwagen oder Straßentankwagen zum Asphaltmischwerk befördert und dort in beheizten Lagertanks auf Vorrat gehalten. Die in Vorratsbunkern lagernden Mineralstoffe (Kies, Splitt verschiedener Körnungen, Sande verschiedener Kornformen) werden entsprechend der im Asphaltlabor erarbeiteten Sollrezeptur in einer elektronisch gesteuerten Dosieranlage zusammengesetzt, anschließend in der Trockentrommel mit direkter Ölflamme auf Mischtemperatur (150 bis 180° C) erhitzt, dabei getrocknet, entstaubt, nach nochmaliger Versiebung endgültig zusammengesetzt und dem Mischer zugeführt. Das heiße Bitumen wird in genau bemessener Menge nebelfein eingedüst und mit den Mineralstoffen gründlich gemischt. Um die Festigkeit des Asphalts zu erhöhen, werden noch Füllstoffe beigemischt, die bei hochwertigem Asphalt vorwiegend aus Steinmehlen bestehen. In begrenztem Umfang dürfen auch die feinen Mineralstoffe verwendet werden, die mit der Abluft aus der Trockentrommel herausgesaugt und zwecks Reinhaltung der Umgebung in besonderen Staubabscheidern von der Luft getrennt werden (Rückgewinnungsfüller).

Das heiße Asphaltmischgut wird nach kurzer Zwischenlagerung im Verladesilo mit möglichst geringen Wärmeverlusten (z. B. LKW mit isolierten Behältern) zur Einbaustelle transportiert, mit elektronisch gesteuerten Einbaumaschinen („Fertigern“) profilgerecht eingebaut und mit Straßenwalzen verdichtet. Fachgerecht eingebauter Asphalt besitzt sofort nach dem Erkalten seine endgültige Festigkeit und kann dann voll belastet werden. Diese Eigenschaft des Asphaltes erlaubt die Herstellung von Fahrbahnbefestigungen unter Aufrechterhaltung des Verkehrs.

Gußasphalt: Gußasphalt unterscheidet sich vom Walzasphalt dadurch, daß er völlig hohlraumfrei zusammengesetzt ist und nach dem Einbau keiner Verdichtung mehr bedarf. Er ist teurer als Walzasphalt, aber sehr widerstandsfähig gegen Verschleiß und deshalb besonders geeignet als Fahrbahnbelag hoch beanspruchter Straßen. Da er auf kleinen Flächen auch im Handverstrich eingebaut werden kann, wird Gußasphalt im Hochbau häufig als Estrich verwendet.



SCHWEFELSÄURE

Schwefelsäure, chemische Bruttoformel H_2SO_4, zählt zu den wichtigsten und stärksten Säuren der anorganischen Chemie. In reinem (wasserfreiem) Zustand bildet sie eine farblose, ölige Flüssigkeit, der Erstarrungspunkt liegt bei 10° C. Beim Erhitzen wasserfreier H_2SO_4 entweicht solange Schwefeltrioxid (SO_3), nach der Reaktionsgleichung $H_2SO_4 \rightarrow H_2O + SO_3$, bis bei einer Temperatur von 338° C eine Mischung der Zusammensetzung 98,3% H_2SO_4 und 1,7% Wasser abdestilliert. Umgekehrt entweicht beim Eindampfen verdünnter H_2SO_4 solange Wasser bis dasselbe Mischungsverhältnis erreicht ist. Beim Verdünnen konzentrierter H_2SO_4 mit Wasser tritt unter starker Wärmeentwicklung eine Volumenkontraktion ein. Konzentrierte H_2SO_4 ist ein sehr gutes Lösungsmittel für Schwefeltrioxid, das dabei entstehende Produkt kommt unter dem Namen Oleum (rauchende Schwefelsäure, Vitriolöl) in den Handel. Die konzentrierte H_2SO_4 des Handels ist eine 98%ige Schwefelsäure.

Die Gewinnung der Schwefelsäure, die in der Natur nur in Form ihrer Salze wie Gips, $CaSO_4 \cdot 2\,H_2O$, Bittersalz, $MgSO_4 \cdot 7\,H_2O$, Schwerspat, $BaSO_4$ Glaubersalz, $Na_2SO_4 \cdot 10\,H_2O$ auftritt, erfolgte etwa bis zum 18. Jahrhundert durch Erhitzen von Alaun oder Eisensulfat. Ein neueres Verfahren war dann die Verbrennung von natürlichem Schwefel mit Salpeter, woraus sich das Bleikammerverfahren entwickelte, das in Deutschland 1815 eingeführt wurde. Heutzutage wird Schwefelsäure in Deutschland vornehmlich nach dem Kontaktverfahren hergestellt, da es im Gegensatz zum Kammerverfahren, das bestenfalls 78%ige Schwefelsäure liefert, die Einstellung jeder Konzentration gestattet.

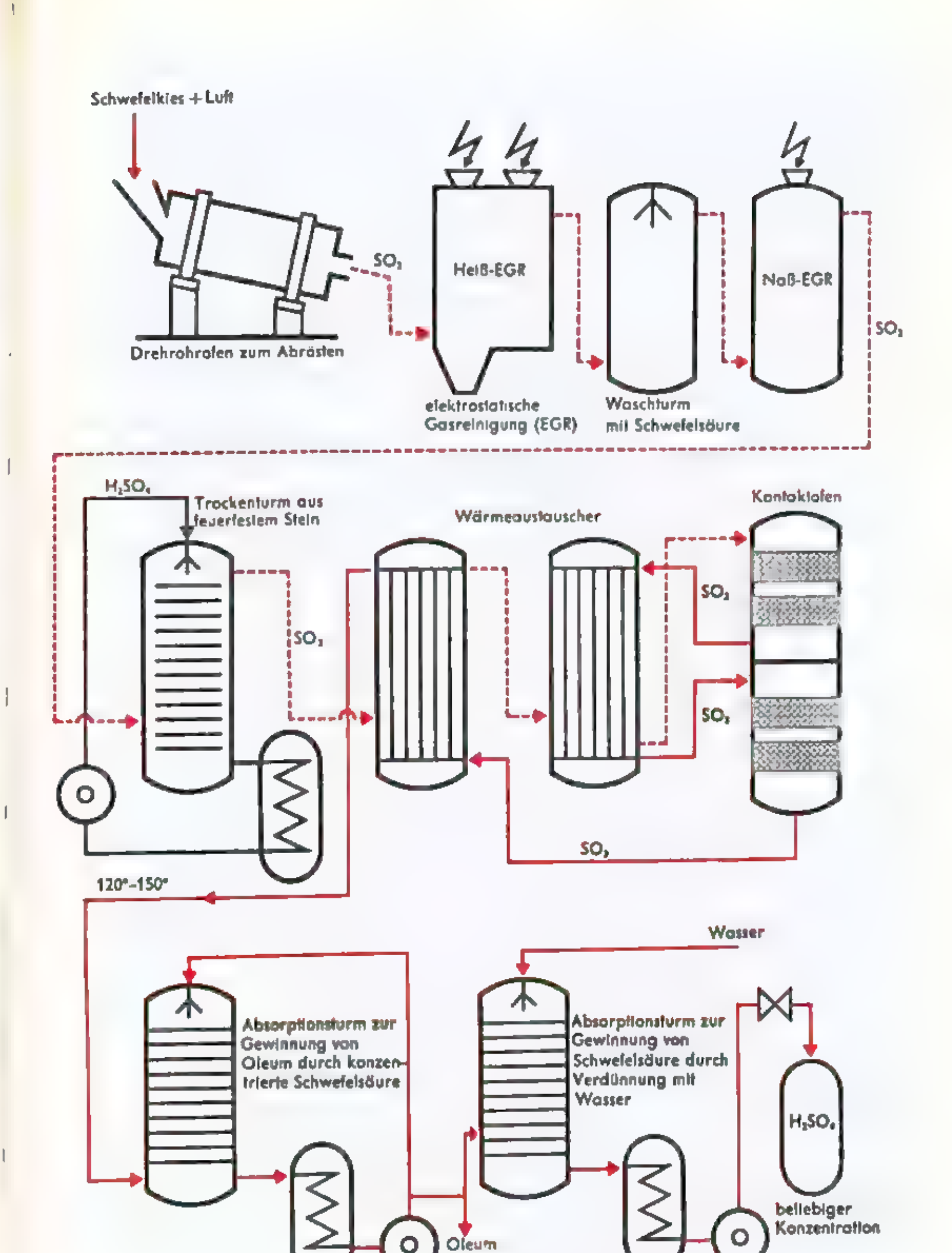
Aus Schwefelkies (Pyrit, FeS_2) wird durch Rösten im Drehrohrofen, im Etagenröstofen oder im Wirbelschichtofen, Schwefeldioxid (SO_2) gewonnen. Die Wahl des Reaktionsofens richtet sich nach Korngröße und Art des Erzes. Nach Abkühlen der Röstgase in Gaskanälen durch Wärmeaustausch von 1000° C auf etwa 400—500° C erfolgt die Abscheidung von Flugstaub durch elektrostatische Gasreinigung an Sprühelektroden.

Im nachgeschalteten Waschturm werden dampfförmige Bestandteile mit Waschsäure (Schwefelsäure) herausgewaschen (hauptsächlich Arsen-, Selen- und Chlorverbindungen). Nebelförmige letzte Verunreinigungen werden durch eine elektrostatische Naßreinigung entfernt. Anschließend erfolgt Trocknung mittels 98%iger Schwefelsäure.

Ein Gebläse saugt das reine, trockene Schwefeldioxid an und drückt es in den Kontaktofen, der den Vanadinkontakt ($V_2O_5/SiO_2/K_2O$) auf Horden enthält. Die Reaktion verläuft bei 430—550° C nach dem Reaktionsschema: $SO_2 + {}^1/_2\,O_2 \rightarrow SO$ (Oxydation erfolgt durch Luftsauerstoff). Ein zwischengeschalteter Wärmeaustauscher dient der Abkühlung der Reaktionsgase und der Vorwärmung der eintretenden Gase.

Die heißen Reaktionsgase werden in Röhrenkühlern mit Luft auf 120—150° C abgekühlt und treten in die Absorber ein, keramisch ausgekleideten Stahltürmen mit Raschigringen, die den Waschtürmen ähneln. Die Absorption des SO_3 erfolgt durch 98%ige Schwefelsäure unter Bildung von Oleum. Zur Einstellung der gewünschten Konzentration wird anschließend Wasser zugeführt. Die dabei freiwerdende Bildungswärme wird durch Rieselkühler abgeführt.

Schwefelsäure wird bei fast allen chemischen Prozessen wie bei der Herstellung von Superphosphat- und Ammonsulfatdünger, bei der Erdölraffination, Sprengstoffherstellung und bei der Herstellung von synthetischen Fasern verwendet.



SALPETERSÄURE

Salpetersäure ist in reinem Zustand eine farblose Flüssigkeit, die bei 87° C siedet. Mit zunehmender Verdünnung steigt der Siedepunkt an. Da sich die reine Salpetersäure bei längerer Aufbewahrung, vor allem unter Lichteinwirkung, zersetzt, enthält über 90%ige Säure fast stets gelöstes NO_2 und zeigt eine charakteristische Gelbfärbung, bei starker NO_2-Konzentration sogar Rotfärbung. Diesem Zersetzungsprozeß kann durch Verdünnen mit Wasser begegnet werden.

Lange Zeit dienten die in der Natur vorkommenden Salze der Salpetersäure, die Nitrate, als Ausgangsstoffe für die Gewinnung der Säure. So erhält man z. B. Salpetersäure durch Zersetzung von Kalisalpeter (Kaliumnitrat, KNO_3) mit Schwefelsäure.

Die Verfahren zur Gewinnung beruhen auf der Zersetzung von Nitraten mit Schwefelsäure, auf der direkten NO-Synthese im elektrischen Lichtbogen sowie auf der Ammoniakverbrennung. Nach dem letzteren Verfahren, das hinsichtlich des Katalysators, des angewandten Druckes und des Verbrennungsgases Luft oder reinem Sauerstoff verschiedene Variationsmöglichkeiten bietet, wird in Deutschland Salpetersäure großtechnisch hergestellt. W. Ostwald entdeckte Platin als geeigneten Katalysator bei der Salpetersäuregewinnung durch Verbrennung von Ammoniak. Doch auch Oxide von Eisen, Mangan und Wismut finden Anwendung. Bei diesen Verfahren wird flüssiger Ammoniak in Rohrbündelverdampfern verdampft und mit Luft vermischt. Das Gasgemisch gelangt über Filter und Vorwärmer in den Ofen, wo an 2 bis 4 übereinanderliegenden Platinnetzen bei Temperaturen von 820 bis 880° C und einer Verweilzeit von 10^{-4} bis 10^{-3} s am Kontakt die Umsetzung erfolgt. Über den Reaktionsablauf bestehen mehrere Theorien. Eine endgültige Klärung liegt noch nicht vor. Die Reaktion verläuft ungefähr nach der Gleichung

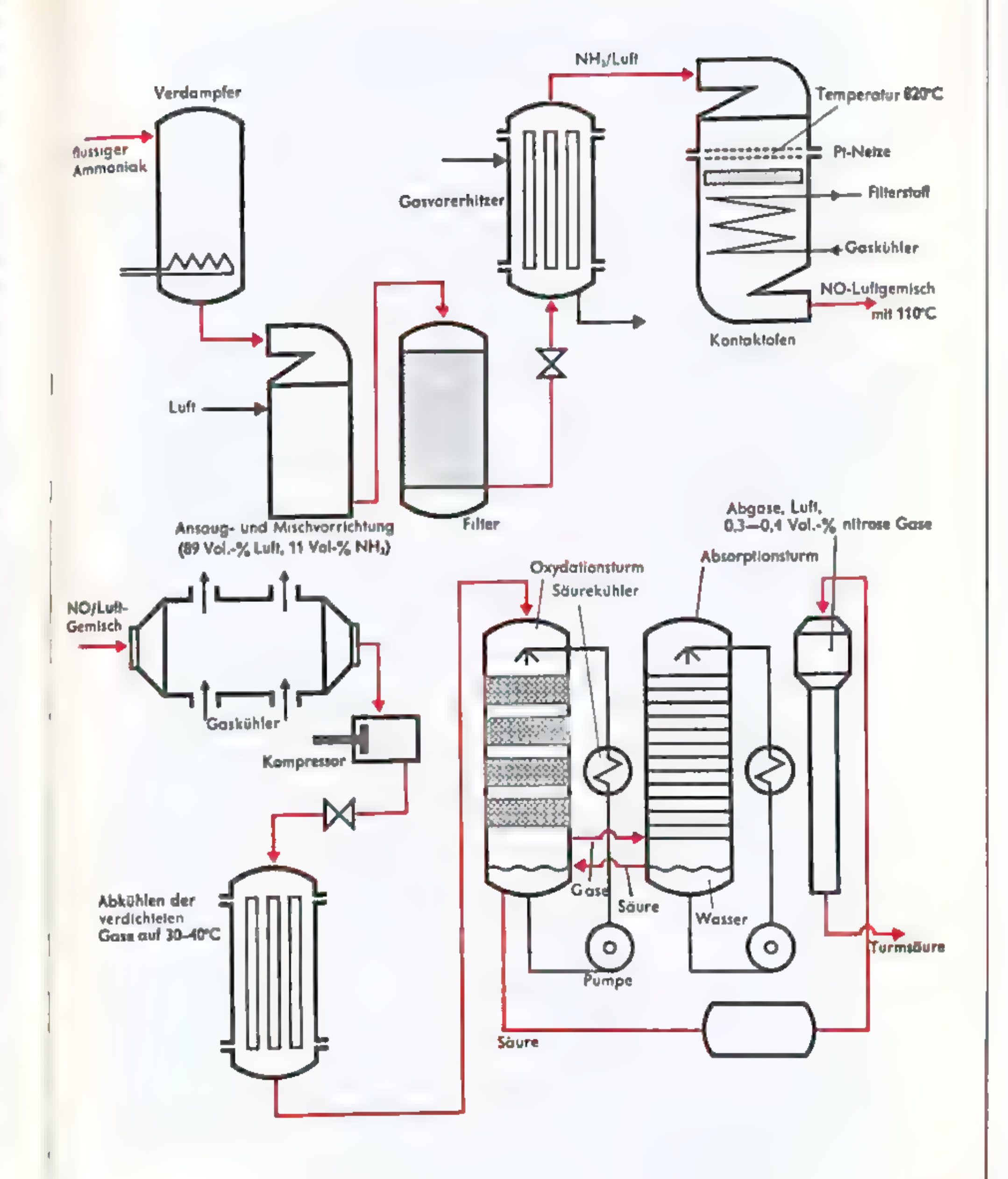
$$4\,NH_3 + 5\,O_2 \rightarrow 4\,NO + 6\,H_2O.$$

Unmittelbar hinter den Platinnetzen befinden sich Filterstoffe, die dem Auffangen der in den Verbrennungsgasen befindlichen instabilen Pt-Verbindungen dienen. Das so niedergeschlagene Platin wird zurückgewonnen. Die Reaktionsgase, die zu 97,5 % aus NO bestehen, werden im Gaskühler abgekühlt. Nach Verlassen des Gaskühlers gelangen die Gase in mehrere hintereinander geschaltete Absorptionstürme, die mit Ringen aus keramischem Material gefüllt sind. Hier werden die nitrosen Gase zu dem Anhydrid der Salpetersäure oxydiert. Die Oxydation erfolgt im ersten Turm gemäß der Gleichung $2\,NO + O_2 \rightarrow 2\,NO_2$. Unter Kühlung wird auf den einzelnen Stufen eine 60%ige Salpetersäure umgepumpt. 80 % der nitrosen Gase werden hier oxydiert. Die Absorption erfolgt in den anschließenden Türmen (insgesamt 4 Türme) durch Wasser unter Zufuhr von Luft gemäß der Reaktionsgleichung: $2\,NO_2 + H_2O + {}^1/_2\,O_2 \rightarrow 2\,HNO_3$.

In der Praxis wird jedoch nicht Wasser, sondern Salpetersäure zunehmender Konzentration verwendet. Die bei der Absorption entstehende Wärme wird durch Kühlung der umgepumpten Säure abgeführt, da tiefe Temperaturen die Absorption begünstigen. Dem letzten Turm wird das benötigte Wasser aufgegeben. Die solcherart gewonnene Säure wird in einem Entgasungsturm von noch vorhandenen nitrosen Gasen befreit, indem man Luft hindurchbläst. Die Abgase, die den letzten Absorptionsturm verlassen, besitzen einen NO-Gehalt von 0,3 bis 0,4 Vol-%.

Die beschriebene Anlage liefert eine 40—60%ige Salpetersäure (Turmsäure); eine höhere Konzentration ist durch Destillation mit konzentrierter Schwefelsäure möglich, dabei gelangt man zu 99—99,5%iger Salpetersäure.

Salpetersäure wird in Korbflaschen, Steinzeuggefäßen oder in Kesselwagen transportiert, die aus V2A-Stahl für Turmsäure und aus Aluminium für konzentrierte Säure bestehen.



AMMONIAKSYNTHESE

Ammoniak (NH_3) ist ein farbloses, stechend riechendes Gas, das sich leicht zu einer farblosen, stark lichtbrechenden Flüssigkeit verdichten läßt. Der Siedepunkt liegt bei —33° C, die hohe Verdampfungswärme ermöglicht den Einsatz von Ammoniak in der Kälteindustrie.

Die Gewinnung von Ammoniak erfolgt vorzugsweise nach dem *Haber-Bosch-Verfahren*, nach dem es erstmals 1913 in der BASF großtechnisch hergestellt wurde. Dabei erfolgt die Vereinigung der Elemente Wasserstoff und Stickstoff am Eisenkatalysator, der mit Aluminium- und Kaliumoxid stabilisiert wird, bei 500° C und 200 at nach $3\,H_2 + N_2 \rightleftharpoons 2\,NH_3$. Andere Verfahren unterscheiden sich vom Haber-Bosch-Verfahren durch die Gewinnung der Ausgangsstoffe sowie durch Änderung von Druck und Temperatur. Die Ausgangsstoffe werden aus Luft und Wasser gewonnen. Dabei erfolgt die Beseitigung von Sauerstoff jeweils durch Kohlenstoff in Form von Koks als Reduktionsmittel. Bei hoher Temperatur wird im Gaserzeuger (Generator; 1) unter Wärmeentwicklung Luft umgesetzt nach

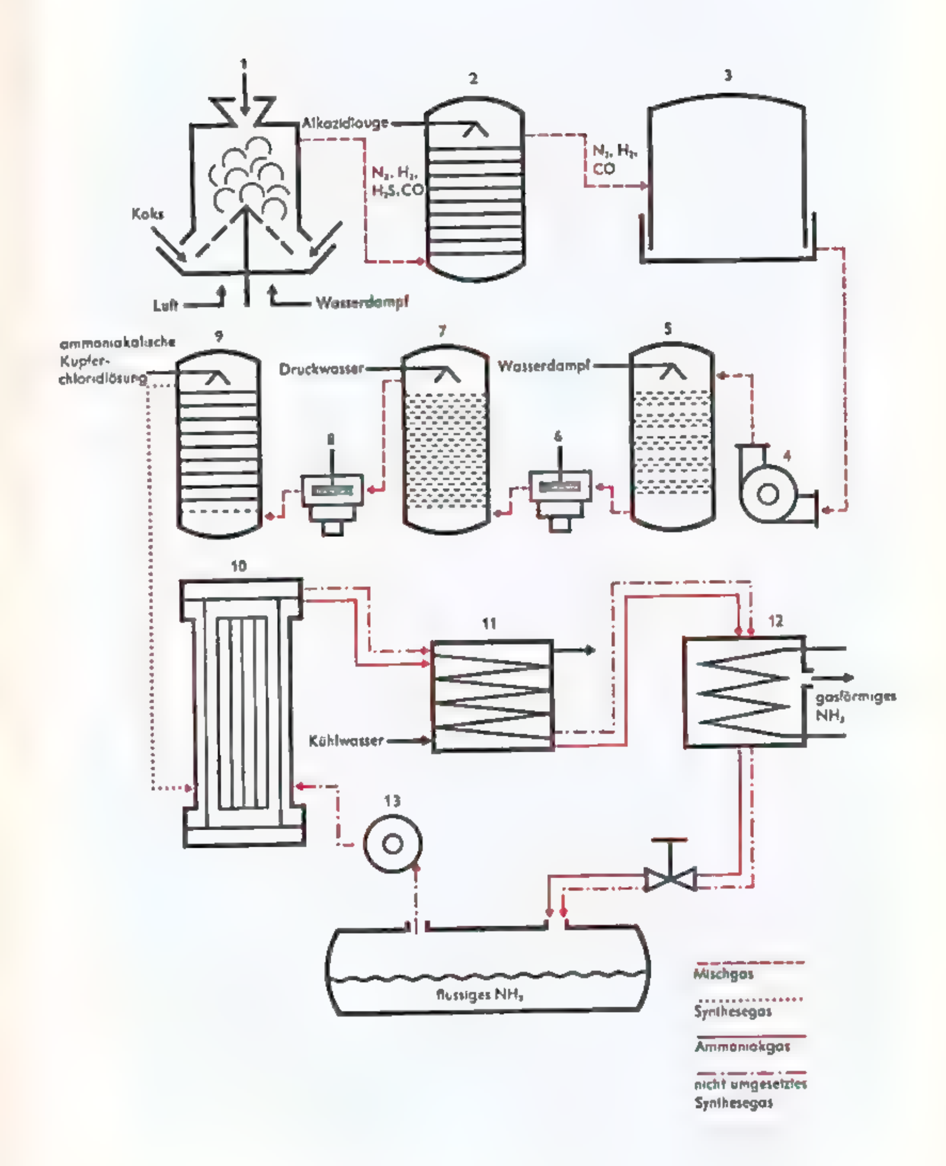
$$4\,N_2 + O_2 + 2\,C \rightleftharpoons 4\,N_2 + 2\,CO$$

unter Bildung von Generatorgas. Am glühenden Koks wird dann unter Wärmeverbrauch Wasserdampf zu Wassergas zersetzt

$$C + H_2O \rightarrow H_2 + CO.$$

Auf diese Weise lassen sich je nach Bedarf durch Heißblasen Generatorgas, durch Kaltblasen aber Wassergas erzeugen. Aus dem Koks stammender Schwefelwasserstoff wird mit Absorptionsflüssigkeit nach dem Alkazid-Verfahren im nachgeschalteten Gaswäscher (2) aus den Gasgemischen entfernt, da dieser leicht zur Vergiftung der später verwendeten Katalysatoren führt. Aus dem Gasbehälter (3) wird mittels Gebläse (4) das nun vorliegende Mischgas, das aus Stickstoff, Wasserstoff und Kohlenmonoxid besteht, einer sogenannten Konvertierung (5) unterworfen, da auch Kohlenmonoxid für die Katalysatoren schädlich ist. Die Konvertierung (Umwandlung des Kohlenmonoxids in Kohlendioxid) geschieht im Wasserstoffkontaktofen mittels Wasserdampf an Eisenoxid-Chromoxidkontakten bei 500° C nach $CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$.

Das abgekühlte Konvertgas (N_2, H_2, CO_2 und Spuren CO) wird von Kompressoren (6) auf 25 at komprimiert und in den Kohlensäurewäscher (7) gedrückt. Mit Druckwasser wird das Kohlendioxid bis auf etwa 1 % herausgewaschen. Letzte Spuren Kohlenmonoxid und Kohlendioxid werden mit ammoniakal. Kupfer(I)-chloridlösung beseitigt. Dabei wird das komprimierte Gasgemisch mit 100 at durch den Waschturm gedrückt (8, 9). Bei richtiger Einstellung des Mischungsverhältnisses von Generatorgas zu Wassergas unter Berücksichtigung des bei der Konvertierung entstehenden H_2 liegt nunmehr das Synthesegas im Verhältnis von N_2 zu H_2 wie 3:1 vor, das, auf 200 at verdichtet, im Kontaktofen (10), einem 12 m langen Druckrohr, umgesetzt wird. Der Ofen enthält ein System von Wärmeaustauscherrohren und Kontaktrohren. An den Wärmeaustauscherrohren nimmt das eintretende Gasgemisch zur Vorwärmung die Reaktionswärme des bereits umgesetzten Gases auf. Da die Reaktion unter Wärmeentwicklung abläuft, ist eine zusätzliche Heizung, wenn die Reaktion durch einen elektrischen Brenner (Heizvorrichtung) in Gang gebracht worden ist, nicht mehr erforderlich. 11 % des eingesetzten Synthesegases werden zu Ammoniak umgesetzt. Das den Ofen verlassende Gasgemisch (NH_3, nicht umgesetztes N_2 und H_2) wird zunächst mit Wasser in einem Schlangenkühler (11) abgekühlt und anschließend in einem Tiefkühler (12) auf —20 bis —30° C gekühlt; dabei fällt Ammoniak flüssig an. Die Kälte im Tiefkühler wird durch Verdampfen von flüssigem Ammoniak erzeugt, das der Produktion entnommen wird. Das nicht umgesetzte Synthesegas wird mittels einer Umlaufpumpe (13) wieder in den Kontaktofen gedrückt, die fehlende Menge durch Frischgas ersetzt.



SYNTHESEGAS UND METHANOLSYNTHESE

Gasgemische, die der großtechnischen Herstellung chemischer Verbindungen (wie etwa Ammoniak, Methanol, Äthylen oder anderer Kohlenwasserstoffe) dienen, werden als Synthesegase bezeichnet. Vorrangig versteht man jedoch unter Synthesegas das Gemisch aus Stickstoff (N) und Wasserstoff (H), das für die synthetische Herstellung von Ammoniak benötigt wird: $N_2 + 3\,H_2 \rightarrow 2\,NH_3$. Über 80 % dieses Gemisches wurde noch Anfang der sechziger Jahre aus festen Brennstoffen gewonnen (s. Ammoniaksynthese, S. 96). Heute wird schon ein großer Teil des für die Ammoniaksynthese notwendigen Synthesegases durch geeignete Aufarbeitung von Erdöl oder Erdgas gewonnen. — Zunehmende Bedeutung besitzen auch die Synthesegase, die zur Herstellung spezieller, industriell in großem Maßstab benötigter Kohlenwasserstoffe oder Alkohole dienen. Diese Synthesegase bestehen meist nur aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff, die sich im richtigen Verhältnis gemischt unter entsprechenden Temperaturen und Drücken, je nach Katalysator zu den unterschiedlichsten Produkten umsetzen lassen, nach dem allgemeinen Schema: $n\,CO + 2\,n\,H_2 \rightarrow (CH_2)_n + n\,H_2O$ (n = Anzahl der Moleküle bzw. Molekülgruppen).

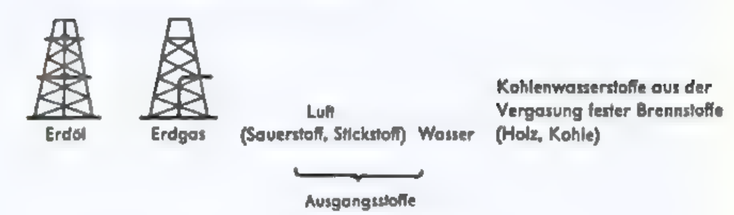
Das nebenstehende Schema erläutert die Möglichkeiten zur Gewinnung von Synthesegasen. Im Gegensatz zur Verarbeitung der festen Brennstoffe bei der Ammoniaksynthese (s. S. 96) zeigt das Schema die Verarbeitung von flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffen. Rohöl, Leichtbenzin, Flüssiggas (Butan), Raffineriegas oder Erdgas werden entweder flammenlos an Platin-Nickel-Katalysatoren oder durch partielle Verbrennung zu Synthesegas umgesetzt. Die vorgewärmten Kohlenwasserstoffe sowie der vorgewärmte Sauerstoff gelangen in den Reaktor. Die Gewinnung von Synthesegas für die Ammoniaksynthese erfordert zusätzliche Zufuhr von Luft (Stickstoff). Die heißen Spaltgase werden durch einen Abhitzekessel geleitet. Der dabei entstehende Wasserdampf wird gegebenenfalls in den Reaktor zurückgeleitet. Eine anschließende Druckwäsche beseitigt entstandenen Rußschlamm. Das Synthesegas wird in einem Rieselkühler abgekühlt und gelangt daraufhin zur Reinigung oder Nachbehandlung. Besonders die durch Vergasung fester Brennstoffe gewonnenen Produkte enthalten Teer, Staub, organische Verbindungen wie Naphthalin, Phenol und Schwefelverbindungen, die für die Weiterverarbeitung hinderlich sind und deshalb entfernt werden müssen. Die eingesetzten flüssigen oder gasförmigen Brennstoffe sind meist sehr schwefelarm oder werden vor der Umsetzung entschwefelt.

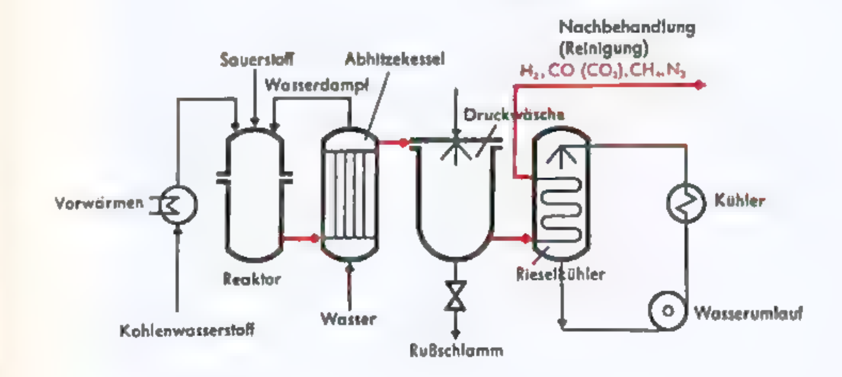
Methanolsynthese:

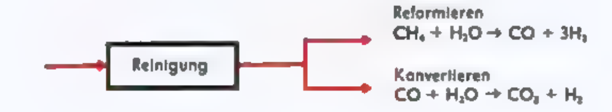
Methanol (CH_3OH), eine farblose Flüssigkeit, ist der einfachste Alkohol. Wegen seines niedrigen Herstellungspreises und seiner günstigen Eigenschaften ist Methanol eines der meist gebrauchten Lösungsmittel der chemischen Industrie. Darüber hinaus dient Methanol als Kältemittel, als Zusatz zu Treibstoffen und als Ausgangsprodukt für die Gewinnung vieler Produkte. Die Gewinnung von Methanol aus Synthesegas erfolgt nach dem Schema: $CO + 2\,H_2 \rightarrow CH_3OH$.

Das im richtigen Mischungsverhältnis vorliegende Synthesegas wird an Chromoxid-Zinkoxid-Katalysatoren bei Drücken von 300 at und 330—370° C umgesetzt. Das methanolhaltige Gas strömt durch einen Wärmeaustauscher, wo es von dem sogenannten Restgas, also nicht umgesetztem Synthesegas, gekühlt wird. Anschließend erfolgt weitere Kühlung mit Wasser. Dabei kondensiert das Methanol. In einem Abscheider geschieht die Trennung von Methanol und Restgas, wobei letzteres über den Wärmeaustauscher wieder in den Reaktor zurückgeführt wird. Das rohe Methanol wird durch Destillation gereinigt (Methanol siedet bei 64,5° C), da es etwas Wasser und geringe Mengen an Nebenprodukten enthält.

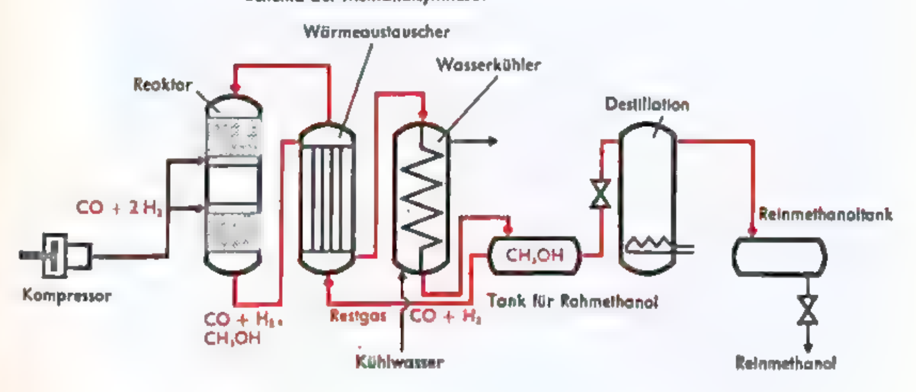
Schema der Synthesegasgewinnung:







Schema der Methanolsynthese:



PHOSPHORGEWINNUNG

Phosphor kommt in der Natur nur in Form der Salze der Phosphorsäure vor. Daraus wird er durch Reduktion gewonnen. Vom elementaren Phosphor gibt es drei Modifikationen: gelben, roten und schwarzen Phosphor. Dabei ist der schwarze Phosphor die bei Zimmertemperatur stabilste Form; man erhält ihn aus der weißen Form durch Anwendung hoher Drücke. Diese Form hat jedoch vornehmlich wissenschaftliches Interesse.

Technisch bedeutsam sind hingegen die beiden anderen Modifikationen. Der weiße Phosphor schmilzt bei 44,1 °C und reagiert in feinverteilter Form schon bei Zimmertemperatur mit Luftsauerstoff. Der rote Phosphor wird unter Luftabschluß durch Erhitzen von weißem Phosphor gewonnen.

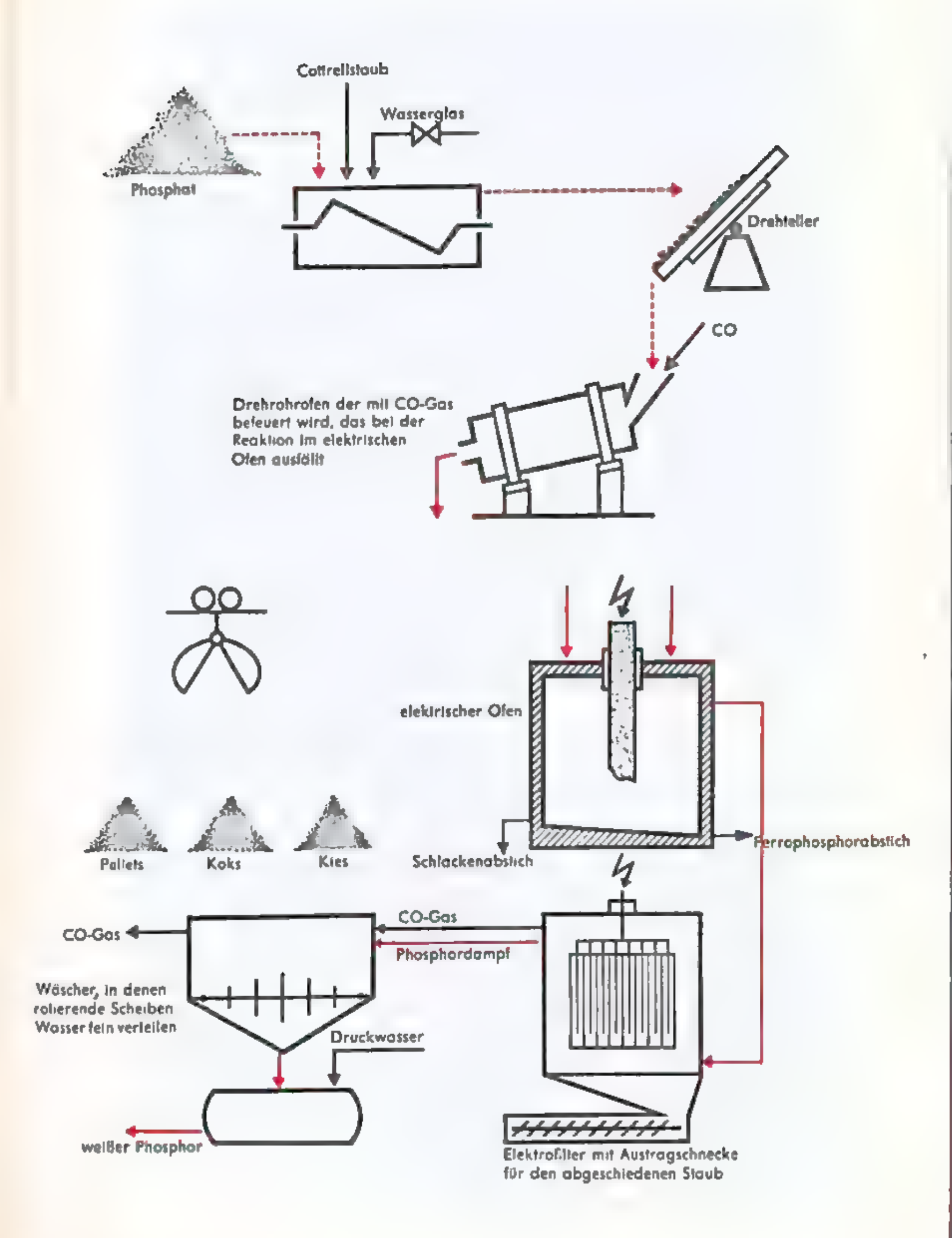
Die Gewinnung des Phosphors wird im Widerstandsofen nach dem elektrothermischen Verfahren vorgenommen. Die hierbei ablaufende Reaktion zeigt folgende Gleichung:

$$2\,Ca_3(PO_4)_2 + 6\,SiO_2 + 10\,C \rightarrow 6\,CaSiO_3 + P_4 + 10\,CO.$$

Die Reaktionsführung im Ofen erfordert ein in Stückform vorliegendes Phosphat. Daher muß das vielfach sandfeine Phosphat granuliert werden. Als Bindemittel werden Natronwasserglas, Cottrellstaub (der der elektrischen Filtration entstammt) und andere Zusätze in einer Mischschnecke innig vermischt und auf einem Drehteller granuliert (Pelletiermaschinen). Die Pellets werden bei hohen Temperaturen auf Rosten oder in Drehöfen zu festen Kugeln gesintert, die zusammen mit Koks und Kies vermischt, den Möller bilden, der dem Ofen zugeführt wird.

Der Ofen besteht aus einer eisernen Wanne mit geneigtem Boden, deren unterer Teil mit Hartbrandkohleblöcken, der obere Teil mit Schamottsteinen ausgemauert ist. Der untere Teil enthält zwei Abstichlöcher für Ferrophosphorabstich und Schlackenabstich, der Deckel ist mit Öffnungen für die drei Elektroden, für die Beschickungsrohre und für den Gasaustritt versehen. Die Elektroden bestehen aus Kohlestampfmasse, die nach Abbrand von oben ergänzt werden können. Das den Ofen verlassende Gas, aus Phosphor und CO bestehend, wird in sogenannten „Cottrells" oder Elektrofiltern entstaubt, die geheizt werden müssen, um eine Kondensation des Phosphors zu verhindern. Der Staub gelangt zur Sinteranlage. Die 250–300 °C heißen Abgase werden in Ströder-Wäscher geleitet, in denen der Phosphor kondensiert wird; der so gewonnene weiße Phosphor wird unter Wasser aufbewahrt. Das die Wäscher verlassende CO-Gas wird entweder zum Beheizen der Sinteranlage und Dampfkessel verwendet oder in hohen Kaminen abgefackelt.

Die Verwendung des Phosphors erfolgt in der Düngemittel- und Waschmittelindustrie. Die Kunststoffindustrie verwendet Phosphorprodukte als Weichmacher. Roter Phosphor, der aus weißem Phosphor unter Luftabschluß durch Erhitzen gewonnen wird, dient der Herstellung von Reibflächen an Zündholzschachteln.



SCHAUMSTOFFE

Schaumstoffe sind poröse Kunststoffe mit sehr geringem spezifischem Gewicht (0,01 bis 0,3 g/cm^3), deren homogenes Gefüge durch die Einlagerung einer Vielzahl von Gasbläschen aufgelockert wird. Im Prinzip handelt es sich bei den Schaumstoffen um verfestigte (erstarrte) Schäume.
Man unterscheidet zwischen echten und unechten Schäumen, wobei bei den echten Schäumen die einzelnen Luftbläschen ihre „Selbständigkeit" aufgeben (vgl. Abb. 1). Die mechanische Festigkeit ist bei denjenigen Schäumen am höchsten, bei denen im Schaumstoff die Gasbläschen vollständig vom Kunststoff umhüllt sind („geschlossenzellig"). Da hier keine Konvektion möglich ist, besitzen diese Stoffe gutes Wärme- bzw. Kälteisolationsvermögen. Besteht zwischen den Gasbläschen eine Verbindung („offenzellig"), so ist die Festigkeit geringer. Diese Materialien haben jedoch ein gutes Schallschluckvermögen.
Für die künstlichen Schaumstoffe ergeben sich drei Herstellungmöglichkeiten, nämlich das Schaumschlagverfahren (Abb. 2) sowie das Treibverfahren mit physikalischen Methoden (Abb. 3) oder mit chemischen Mitteln (Abb. 4). Als Ausgangsmaterialien lassen sich einsetzen: natürlicher und synthetischer Kautschuk, Polyvinylchlorid (PVC), Polystyrol, Harnstoff- und Formaldehydkondensationsprodukte. Nach dem Schaumschlagverfahren wird Kautschuklatex unter Hinzufügung von Füllstoffen, Vulkanisationsbeschleunigern und Schaummitteln (oberflächenaktiven Substanzen) mit Luft zu einem Schaum gerührt, der geliert und anschließend mit Heißluft vulkanisiert wird (Dunlop-Verfahren). Harnstoff-Formaldehyd-Schäume (Abb. 2) werden hergestellt, indem eine Seifenlösung mit einer noch nicht vollständig kondensierten, wasserlöslichen Harzlösung und Luft in einem Schnellrührwerk aufgeschäumt wird. Der Säurezusatz bewirkt die Weiterkondensation (z. B. bei der Herstellung von Iporka®). Die auf physikalischer Grundlage arbeitenden Verfahren wenden als Treibgas Stickstoff, Kohlendioxid oder Pentan an. Die unter Druck im Material gelösten Gase werden bei Druckentlastung wieder abgegeben und führen so zum Schäumen. PVC-Pasten (Abb. 3) werden bei Temperaturen von —5° C bis 0° C mit Kohlendioxid unter 20 at verarbeitet. Die leicht fließende Masse gelangt in die Heizzone, wo das gelöste CO_2 unter Aufschäumen entweicht. Bei einer Temperatur von 150° C geliert der Schaum, um anschließend durch Abkühlen fixiert zu werden. Polystyrol wird mit Pentan geschäumt, das bei der Polymerisation bereits zugegeben wird (Styropor®).
Die chemischen Schaumverfahren beruhen auf dem Vermögen gewisser Substanzen, beim Erwärmen unter Freisetzung von Gasen zu zerfallen, was die Ausbildung von Poren bewirkt. Als Treibmittel werden etwa Azoverbindungen, N-Nitrosoverbindungen und Azide verwendet. Allen diesen Verbindungen ist gemeinsam, daß sie bei Zersetzung Stickstoff entwickeln. Die Polyurethanschaumstoffe (Abb. 4) werden durch geeignete Polymerisation von Dialkoholen ($HO\text{-}R_1\text{-}OH$) mit Diisocyanaten ($OCN\text{-}R_2\text{-}NCO$) und Wasser hergestellt. Der Kunststoff bildet sich nach dem Reaktionsschema:
$HO\text{-}R_1\text{-}OH + OCN\text{-}R_2\text{-}NCO \rightarrow (\text{-}O\text{-}R_1\text{-}O\text{-}CO\text{-}NH\text{-}R_2\text{-}NH\text{-}CO)_n$.
Als Treibmittel zugesetzte Diisocyanate reagieren mit Wasser unter CO_2-Entwicklung, das als Treibgas wirkt und Bildung von Diaminen:
$OCN\text{-}R\text{-}CNO + 2\,H_2O \rightarrow H_2N\text{-}R\text{-}NH_2 + 2\,CO_2$.
Die Reaktionsmischung wird in Formen gegossen, in denen dann sowohl das endgültige Verschäumen als auch der Härtungsprozeß unter Druck (Wasserdampf) und Erwärmen vor sich gehen. Die Schaumblöcke werden mit Schneidemaschinen zu Platten oder Folien zurechtgeschnitten.
Schaumstoffe haben im Bauwesen große Bedeutung als Wärme- und Schallisolationsmaterialien erlangt, darüber hinaus sind Schaumstoffe als Polstermaterial, zur Herstellung von Badematten, Schwämmen usw. genauso verwendbar wie als Verpackungsmaterial und als Vorform beim Metallguß.

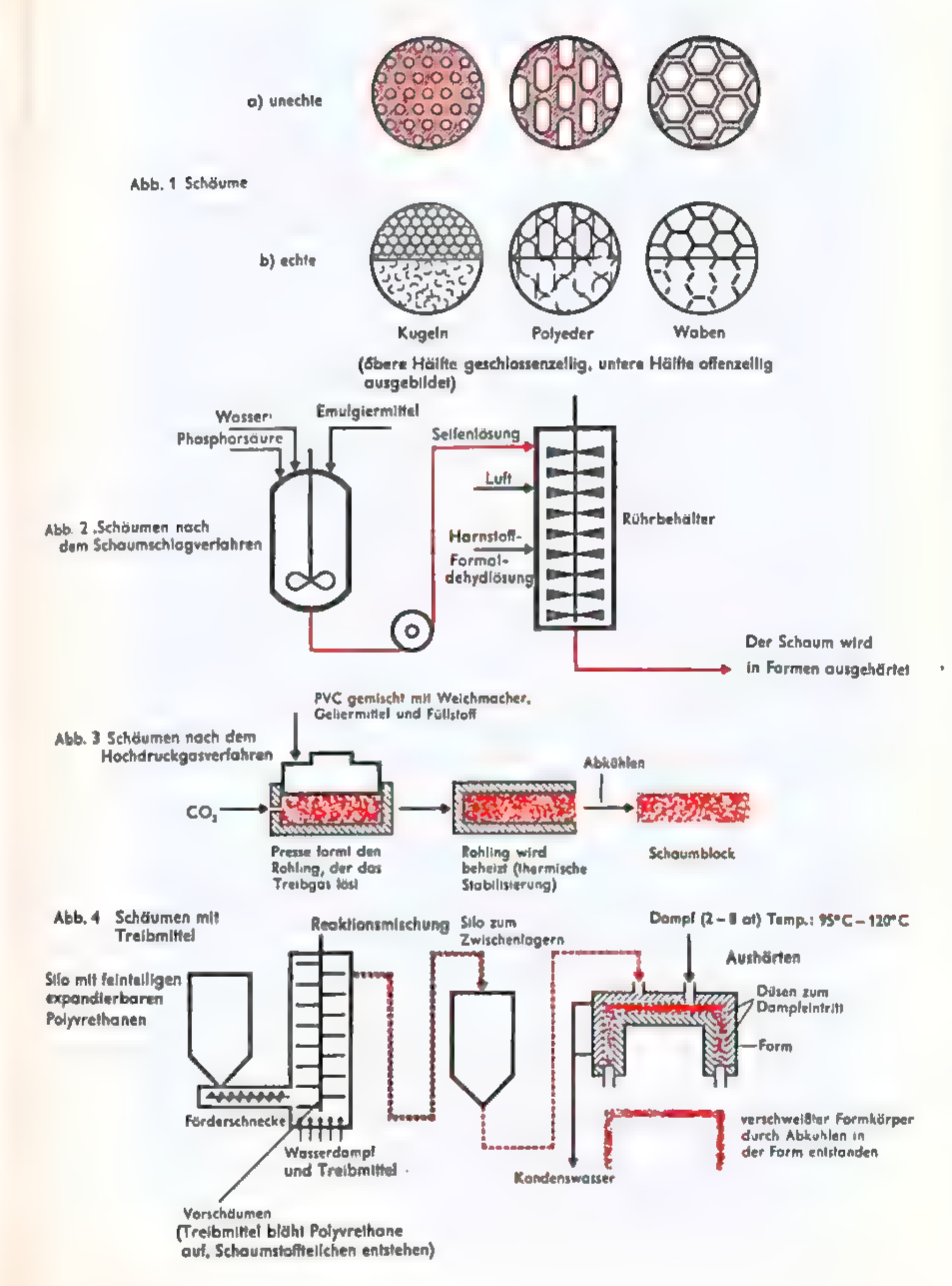


Abb. 1 Schäume

Abb. 2 Schäumen nach dem Schaumschlagverfahren

Abb. 3 Schäumen nach dem Hochdruckgasverfahren

Abb. 4 Schäumen mit Treibmittel

TROCKENEIS

Trockeneis besteht aus gepreßtem Kohlensäureschnee. Dies ist Kohlensäure in festem Zustand mit einer Temperatur von —79° C. Kohlensäure (richtiger Kohlendioxid, CO_2) ist unter normalen Bedingungen ein farb- und geruchloses, in wäßriger Lösung säuerlich schmeckendes Gas, dessen spezifisches Gewicht eineinhalbmal so groß ist wie das der Luft. Genau wie Wasser (und alle anderen Stoffe) kann CO_2 in den drei Aggregatzuständen fest, flüssig, gasförmig vorkommen. Außerdem besitzt Kohlensäure die Eigenschaft, zu sublimieren, d. h. direkt vom festen in den gasförmigen Aggregatzustand überzugehen, ohne flüssig zu werden.
Aus der Dampfdruckkurve eines Stoffes kann ersehen werden, bei welchen jeweils unterschiedlichen Druck- und Temperaturverhältnissen ein bestimmter Zustand vorliegt (Abb. 1 und 2). Gemäß den Linien im Dampfdruckdiagramm erfolgt jeweils der Übergang von einem Aggregatzustand in den anderen unter Wärmeaufnahme bzw. Wärmeabgabe. Besonders interessant ist dabei der sog. Tripelpunkt, an dem alle drei Aggregatzustände zusammen vorliegen können. Dieser liegt bei Wasser z. B. bei einem Druck von 4,6 mm Quecksilbersäule ($\approx$ 1/150 at) und 0,01° C (Abb. 1). Für CO_2 dagegen (Abb. 2) liegt dieser Punkt bei 5,1 at und —56,2° C. Die Dampfdruckkurve gibt die Abhängigkeit der Siedetemperatur vom Druck an; so siedet (Abb. 1) Wasser z. B. bei einem Druck von 1 Atmosphäre bei 100° C, Kohlensäure (Abb. 2) trotz eines Drucks von rd. 60 at schon bei 0° C, wie aus den Abb. 1 und 2 ersichtlich ist. Unter normalem Atmosphärendruck (1 at) erfolgt der Übergang fester Kohlensäure in gasförmige Kohlensäure bei —79° C, wobei der flüssige Aggregatzustand durch Sublimation übersprungen wird.
Zur Herstellung von Kohlensäureschnee kühlt man das Kohlendioxid bei hohem Druck (bis 70 at) ab und verflüssigt es dadurch. Durch weitere Abkühlung gelangt man dann in die Nähe des Tripelpunktes. Nun wird die unter Druck stehende, flüssige Kohlensäure plötzlich entspannt, die Flüssigkeit zersprüht und wird zu Schnee, da die Verdunstung eines Teils der Flüssigkeit den Rest stark abkühlt. Die Energie nämlich, die zum Übergang eines Stoffes aus dem flüssigen in den gasförmigen Zustand erforderlich ist, wird der Umgebung als Wärme entzogen. Dadurch wird die Trennungslinie flüssig — fest des Dampfdruckdiagramms überschritten, man kommt aus dem Bereich der flüssigen in den der festen Kohlensäure. Zur Durchführung der beschriebenen Vorgänge wird die gasförmige Kohlensäure durch drei- bis vierstufige Kompressoren mit zwischen- und nachgeschalteter Kühlung verflüssigt (Abb. 3) und anschließend die flüssige Kohlensäure in einem Turm entspannt. Dadurch wird etwa 1/3 der Kohlensäure in Schnee verwandelt; die restlichen 2/3 werden gasförmig abgezogen, wieder verdichtet und in den Prozeß zurückgeführt. Der Schnee wird durch Pressen zu Blöcken von 20—120 kg verarbeitet. Verwendung findet Trockeneis als Kühlmittel in der Kältetechnik.

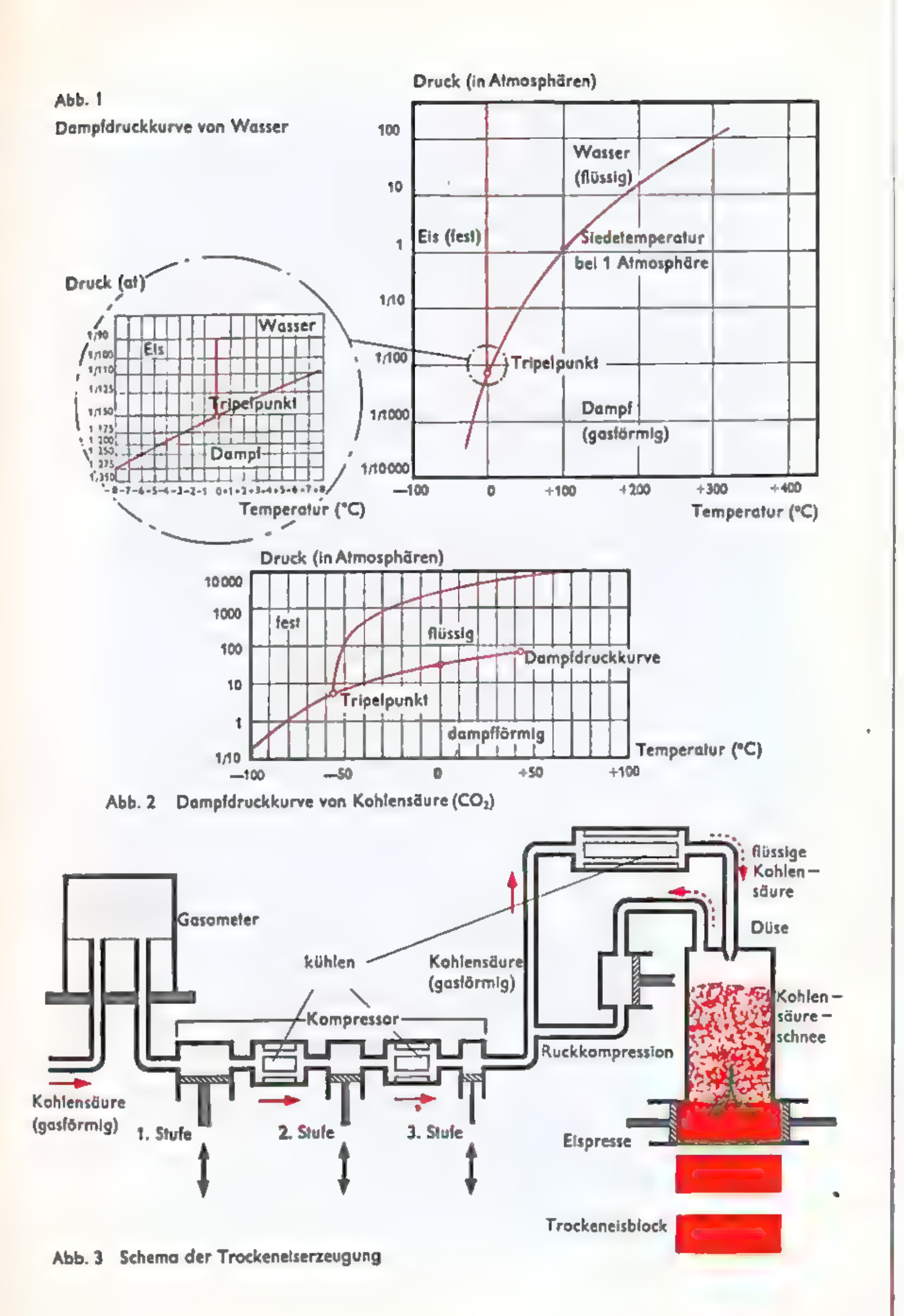


Abb. 1
Dampfdruckkurve von Wasser

Abb. 2 Dampfdruckkurve von Kohlensäure (CO_2)

Abb. 3 Schema der Trockeneiserzeugung

LAGERSTÄTTENERSCHLIESSUNG

Planmäßige geologische Kartierung und Erkenntnisse zur Entstehung von Lagerstätten haben sich als wichtige Hilfsmittel bei der Suche nach nutzbaren Bodenschätzen erwiesen. Mit Beginn des 20. Jahrhunderts hat dann die angewandte Geophysik eine praktische Untergrunderforschung ermöglicht. Man arbeitet seitdem mit folgenden Methoden: Gravimetrie, Magnetik, Sprengseismik und Geoelektrik.

Bei der Gravimetrie handelt es sich um eine Methode zur Messung der durch die Erdmassen, die Erdrotation und die Massen benachbarter Weltkörper erzeugten Schwerebeschleunigung (Schwerkraft) an einzelnen Stellen der Erde. Störungen der Schwerebeschleunigung an der Erdoberfläche ergeben sich zunächst aus der Massenverteilung im Erdinnern. So führen Einlagerungen und Aufwölbungen von Massen größerer Dichte zu positiver Abweichung der Normalschwere, während Senken und Einlagerungen von Massen geringerer Dichte eine negative Abweichung bedingen. Zur Messung werden zur Zeit zwei Gerätetypen verwendet: das Pendel (s. Abb. 1 a) und das auf dem Prinzip der Federwaage beruhende Gravimeter (s. Abb. 1 b). Beim Pendel (Pendellänge l) werden die Schwingungszeit T und die Amplitude φ der Pendelbewegung gemessen und daraus die Schwerebeschleunigung g abgeleitet:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}\left(1 + \frac{\varphi^2}{16} + \dots\right).$$

Pendel gestatten absolute Schweremessungen, während mit Gravimetern nur Schweredifferenzen zwischen verschiedenen Punkten der Erde bestimmt werden können.

Die Magnetik, ein Verfahren zur Messung des erdmagnetischen Feldes, stellt die durch den verschieden starken Gehalt des Gesteins an magnetischen Bestandteilen verursachten Veränderungen des normalen erdmagnetischen Feldes fest. Bringt man zum Beispiel eine Magnetnadel in ein magnetisches Feld, so erfährt diese ein Drehmoment und tendiert dazu, sich in Richtung der Feldlinien einzustellen. Ordnet man diese Nadel so an, daß sie eine wohldefinierte Ruhelage und eine definierte Auslenkungskonstante hat, so kann man aus dem Winkel der Auslenkung auf die Richtung und die Stärke des auszumessenden Magnetfeldes schließen. Besonders starke Abweichungen erzeugen Erzkörper.

Häufigstes geophysikalisches Verfahren ist die Seismik, die vor allem in der Erdöl- und Erdgaserschließung regelmäßig angewandt wird. Auf Profilachsen im Gelände werden in geringtiefen Bohrlöchern hochbrisante Sprengladungen elektrisch gezündet. Die entstehenden „Erdbebenwellen" werden in der Tiefe an markanten Schichtgrenzen reflektiert und gelangen, mit voneinander abweichenden Laufzeiten, an die Erdoberfläche zurück. Hier werden sie von sogenannten Geophonen (Vertikalseismographen) registriert. Die elektrischen Impulse erfahren eine Verstärkung, Filterung und Schwingungsausgleich und werden über Oszillographen auf einem ablaufenden Filmstreifen (mit Millisekundendiagramm) festgehalten (Abb. 2). Der Kurvenverlauf wird anhand empirisch bekannter Daten ausgewertet, und zwar auf Tiefenlage und Einfallen sowie auf Verwerfungen und Aufwölbungen der Schichten bis 4000 m Teufe. Elektrische Schürfmethoden nutzen das Eigenpotential von Mineralverbindungen aus. Hierbei spielt die unterschiedliche Sauerstoff- und Metallionenkonzentration im Porenwasser des Gesteins (Oxydations- und Reduktionszone) die entscheidende Rolle. Infolge dieses Konzentrationsunterschiedes bilden sich an örtlich getrennten Stellen der Lagerstättenoberfläche verschieden große galvanische Kontaktpotentiale. Das Metallerzvorkommen wirkt — mit umgekehrtem Sinn — wie eine Batterie, bei der das Elektrodenmaterial (Lagerstätte) konstant und die Elektrolytenkonzentration (Porenwasser) differiert auftritt (Abb. 3).

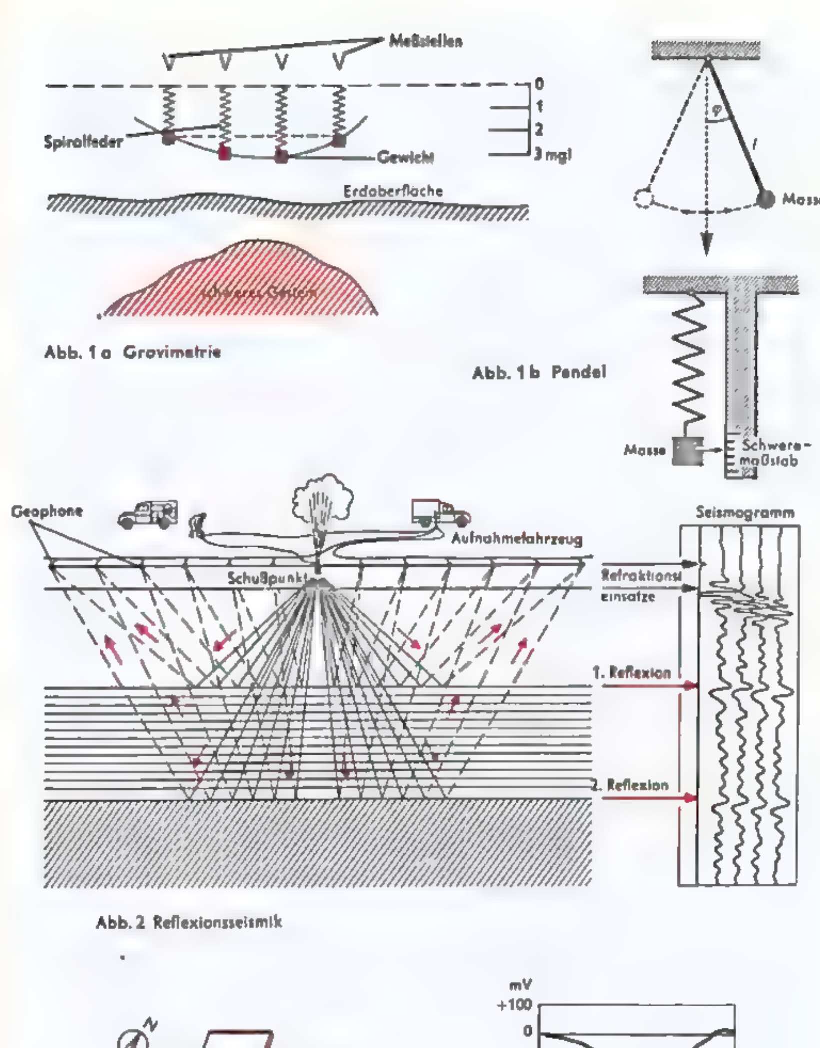


Abb. 1 a Gravimetrie

Abb. 1 b Pendel

Abb. 2 Reflexionsseismik

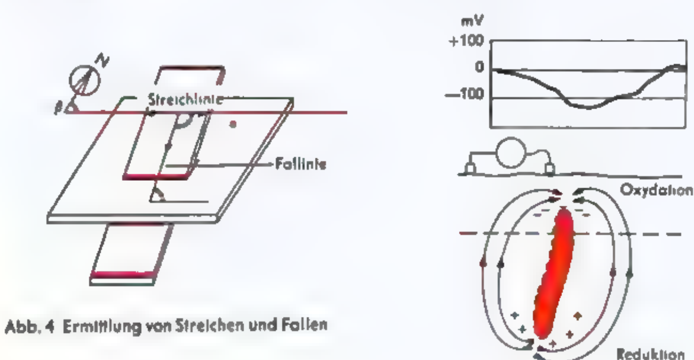


Abb. 4 Ermittlung von Streichen und Fallen

Abb. 3 Eigenpotentialverfahren

TIEFBOHRTECHNIK

Tiefbohrungen dienen der Auffindung mineralischer Rohstoffe und, soweit diese flüssig oder gasförmig sind, auch ihrer Gewinnung. Die an diesen Zweig der Technik gestellten hohen Anforderungen (Erreichen großer Teufen bei gleichzeitig raschem Bohrfortschritt) haben, unter Aufgeben des jahrhundertelang angewandten schlagenden Bohrens (mit Schwengel, Meißel am Seil oder starrem Gestänge und „Umsetzen" von Hand und ständigen Bohrunterbrechungen beim Hochfördern des Bohrschlamms) zum heute fast allein üblichen kontinuierlichen drehenden Bohren geführt. Mit diesem sogenannten Rotary-Verfahren wurden Tiefen über 8000 m erreicht. Ein mit einer Kronenlastaufnahme bis zu 600 t errichteter Turm in Stahlkonstruktion bis zu 60 m Höhe (für geringere Kronenlast vielfach als Klappmast auf einem Fahrgestell ausgebildet) hält über einen Flaschenzug das Bohrgestänge. Eine Vierkantstange, die in eine entsprechende Aussparung des maschinell angetriebenen Drehtisches eingepaßt ist, überträgt die Drehbewegung auf das Gestänge und den mit ihm verschraubten Meißel (Abb. 1). Im harten Gebirge wird ein Rollenmeißel (Abb. 2) verwendet. Er besteht aus drei gegeneinander versetzten, kegelförmigen, gezahnten Stahlkörpern mit aufgeschweißten Hartmetallstücken (Wolframcarbide). Die Bohrstangen sind hohl; durch sie wird während des Bohrens mittels Pumpen eine Spültrübe herabgedrückt, die im Raum zwischen Gestänge und Bohrlochwandung wieder hochsteigt und im Kreislauf gehalten wird. Diese Umlauftrübe ist eine, durch geeignete Zusätze, auf höheres spezifisches Gewicht (1,2 bis 1,4) gebrachte, wässerige Suspension (Dickspülung). Sie tritt am Meißel aus, kühlt zunächst dieses im Erdinneren heißlaufende Werkzeug und hält die Bohrlochsohle sauber. Danach transportiert sie das Bohrklein nach über Tage. Dort wird sie auf Vibrationssieben geklärt, wobei ihr Gesteinsproben entnommen werden. Schließlich sorgen Spülungszusätze für eine ständige Verleimung der Bohrlochwand und verhindern damit deren Zusammenfallen. Eine letzte Aufgabe der Spülung besteht darin, daß ihr hohes Gewicht unerwartet auftretendem Gas- oder Öldruck entgegenwirkt.

Beim Erbohren aufschlußreicher Gesteinspartien gestattet das Rotary-Verfahren das Ziehen von Kernen: Statt des gewöhnlichen Meißels wird ein Kernrohr mit ringförmiger Bohrkrone (ebenfalls mit Hartmetallstücken besetzt) benutzt, in welches das unverritzte Gebirge beim Bohrfortgang stalagmitähnlich hineinwächst.

Die Bohrstangen (in Längeneinheiten bis zu 32 m) werden auf der Arbeitsbühne im Turm abgestellt. Hier befindet sich auch das Steuerpult für die Maschinenbedienung. Seitlich unterhalb stehen die Motoren (bis zu 2500 PS) für den Antrieb von Windwerk, Drehtisch, Pumpen u. a.

Eine andere Art drehenden Bohrens stellt die Bohrturbine dar. Sie erspart, durch Verlegung des Meißelantriebs auf die Bohrlochsohle, den langen Weg der Bewegungsübertragung über das Gestänge und erfordert daher nur etwa den zehnten Teil der am Drehtisch aufzubringenden Leistung. Die Axialturbine – mit bis zu mehreren 100 Stufen – wird über Leit- und Laufräder von der Umlaufspülung angetrieben. Letztere steht dabei unter Pumpdrücken bis zu 150 at. Die Drehzahlen schwanken zwischen 400 und 900 U/min. Als Bohrfortschritt sind, je nach Gebirgshärte, 10 bis 20 m/h erreicht worden.

Die Erschließung und Nutzbarmachung von Bodenschätzen (vorwiegend von Erdöl und Erdgas) im küstennahen Kontinentalsockel (Schelfbereich) hat in Binnenseen oder im Meer zu sogenannten Offshore-Bohrungen geführt. Die hierfür geschaffenen Anlagen sind auf einen Teufenbereich von rund 6000 m zugeschnitten. Voraussetzung ist die Erstellung einer Standfläche für das Bohrgerät. Man kann drei Grundprinzipien unterscheiden: Sie können als Bohrschiff auf dem Wasser schwimmen oder sich als schwimmfähige Plattform bzw. als versenkbarer Leichter auf den Meeresboden abstützen oder schließlich als feste Bohrplattform (Bohrinsel) aus einzelnen Elementen auf dem Meeresboden aufgebaut werden (Abb. 3 und 4). Die größte bisher überbrückte (durchsunkene) Wassertiefe beträgt 42 m.

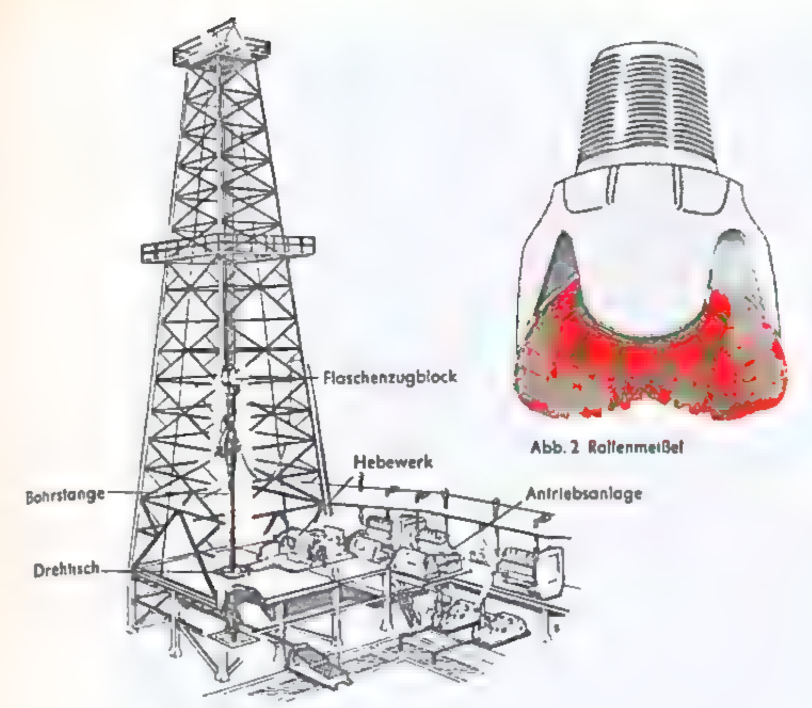


Abb. 1 Rotary-Bohranlage

Abb. 2 Rollenmeißel

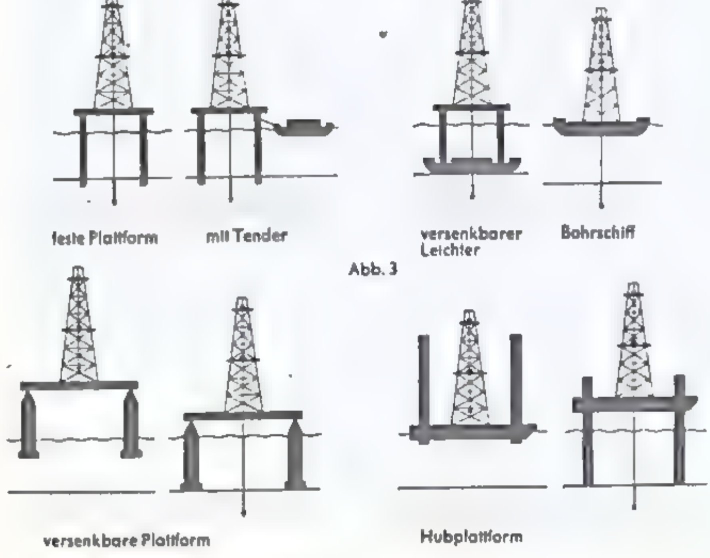


Abb. 3

Abb. 4

SCHACHTABTEUFEN

Das Abteufen großer Schächte wird durchweg von Spezialfirmen, nicht vom Grubenunternehmen selbst, ausgeführt. Im standfesten trockenen Gebirge geschieht dies von Hand, mittels Bohr- und Schießarbeit. Zum Laden des anfallenden Haufwerks auf der Schachtsohle werden u. a. Polypgreifer eingesetzt (Abb. 2). Sie laden in einen Schachtkübel aus geschweißter starker Stahlwandung von 1 m^3 Inhalt, der vom Abteufhaspel mit sogenannter Schlittenführung nach über Tage gezogen wird. Ziegelsteinmauerung erfolgt absatzweise (z. B. von 50 zu 50 m) von unten nach oben, auf jeweils stehenbleibendem Gebirgssockel und verstärktem Mauerfuß. In nassen und druckhaften Gesteinsschichten wird die Schachtwandung mit sogenannten Tübbings ausgekleidet (Abb. 3). Dies sind dickwandige Stahlgußsegmente mit Verstärkungsrippen und Flanschen von 1,3 m Höhe. Sie werden zu Ringen zusammengeschraubt. Die Zwischenräume verstemmt man mit Blei. Durch Übereinanderbau oder jeweiliges Unterhängen der Ringe entsteht eine geschlossene, wasserdichte und gebirgsdruckfeste Tübbingsäule. Sie wird abschließend mit Beton hinterfüllt (korrosionsfeste Sonderzemente). Bei wasserreichen, lockeren Schichten kann ein Schachtbohrverfahren angewandt werden, mit dem in mehreren aufeinanderfolgenden Bohrstufen bis zu fünfhundert Meter tiefe Schächte von fünf Meter Durchmesser hergestellt werden können. Gebohrt wird mit Dickspülung, die sowohl dem hydrostatischen als auch dem Gebirgsdruck entgegenwirkt. Das Bohrklein wird mit Mammutpumpen (Druckluftbetrieb) im Gestänge hochgefördert. Der Schachtausbau wird als geschlossener Kesselblechzylinder kontinuierlich nachgelassen und einzementiert.
Beim Senkschachtverfahren (Abb. 2) sinkt der über Tage hergerichtete fertige Schachtausbau (Ziegelmauerwerk), der an seinem unteren Ende einen stählernen Schneidschuh besitzt, infolge seines Eigengewichts oder durch zusätzliche Belastung in das, in gewöhnlicher Ausbruchsweise von Hand erreichte, jeweilige Schachttiefste nach. Während des Senkens wird die Schachtsohle durch Polypgreifer vertieft. Dem Maß des Niedersinkens entsprechend wird die Wandungsröhre über Tage aufgebaut. Eine weitere Abteufart beruht darauf, daß wasserführende Hohlräume im Gebirge zunächst durch Einpressen von Zement geschlossen werden. Der durch Bohrlöcher in die Schichten gedrückte Zementleim erstarrt nach gewisser Zeit, dichtet die mit Wasser gefüllten Räume ab und erlaubt danach eine der gewöhnlichen Abteufarbeiten von Hand.
In lockerem sowie in festem, stark wasserführendem Gebirge wird regelmäßig das Gefrierverfahren angewandt. In zwei bis drei Meter Entfernung vom Ausbruchsrand des Schachtansatzes werden, in gegenseitigem Abstand von etwa einem Meter, Bohrlöcher gestoßen, in denen ein Kälteträger (Chlorcalciumlauge) zum Umlauf gebracht wird (Abb. 4). Als Kältemittel wird Ammoniak benutzt (Expansionsprinzip). Kälteerzeugung und Rückkühlung erfordern zusätzliche Anlagen über Tage und tragen zu dem hohen Kostenaufwand dieser Abteufmethode bei. Der Kälteträger (−18 °C bis −24 °C) wird durch eine Umwälzpumpe in ständiger Bewegung erhalten. Nach Bildung des gewünschten Frostkörpers wird im gewöhnlichen Verfahren abgeteuft. Als Schachtausbau kommt bei der Gefriermethode nur eine vollständige Tübbingsäule in Frage. Bei Vermutung großer wasserführender Hohlräume im Gebirge oder bei Salzwasser im Gebirge geht dem eigentlichen Gefrieren eine Zementierung voraus. Nach dem Auftauen des Frostkörpers, das nicht künstlich beeinflußt wird, werden die Fallrohre gezogen. Man hat den Gefrierprozeß bis in 600 m Teufe durchführen können.

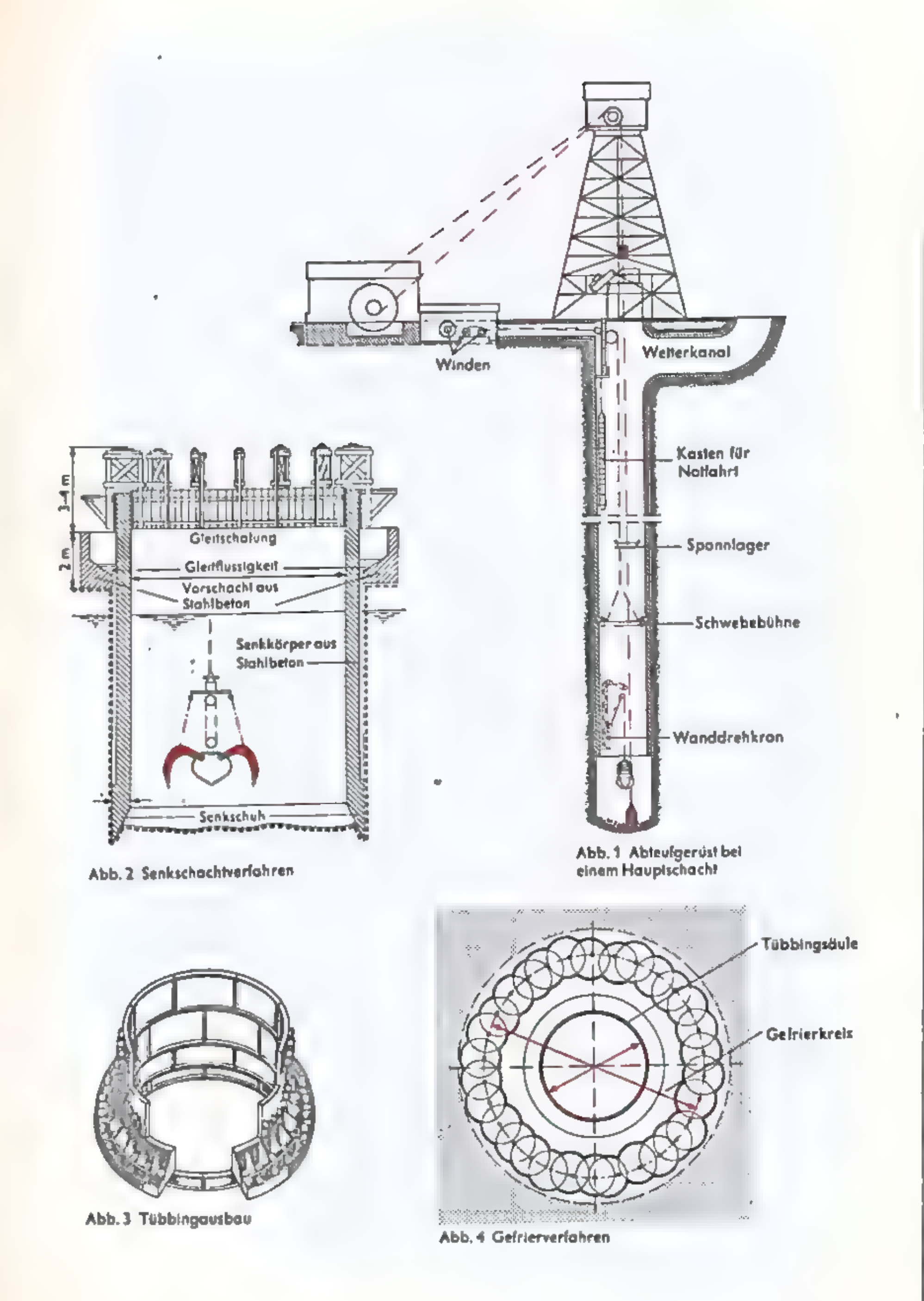


Abb. 1 Abteufgerüst bei einem Hauptschacht

Abb. 2 Senkschachtverfahren

Abb. 3 Tübbingausbau

Abb. 4 Gefrierverfahren

SCHACHTFÖRDERUNG

Die Schachtförderung besorgt das Heben des Fördergutes vom Füllort nach über Tage, den Material- und Bergetransport in die Grube sowie die Seilfahrt (Mannschaftsbeförderung). Der neuzeitliche Schachtbetrieb verläuft vollautomatisch mittels Kontaktsteuerung sowie optischer und akkustischer Signalgebung (mit Verriegelung bis zum Fertigsignal) bei der Seilfahrt. Alle Schachtförderanlagen fahren im Gegengewicht mit zwei in entgegengesetzter Richtung sich bewegenden Körben. Grundelemente dieser Förderweise sind die Antriebsmaschine, der Schachtturm (bis zu 60 m hohes Gerüst aus Stahlkonstruktion), das Förderseil nebst dem Seilträger, das Fördermittel (Korb oder Gefäß) nebst dessen Verbindung zum Seil (Zwischengeschirr) und die Schachtführungseinrichtungen (Spurlatten).
Auskunft über Art und Anordnung der Schachteinbauten gibt die Darstellung der „Schachtscheibe". Große Schächte (stets kreisrunder Querschnitt bis zu 7 m ⌀) verfügen über zwei Förderungen, also über vier sogenannte *Fördertrums* (Abb. 1). Zum Seilgewichtsausgleich dienen Unterseile. Als Antriebsenergie kommt Dampf oder elektrischer Strom in Frage. Sehr verbreitet ist die Gleichstrommaschine (Leonardschaltung). Sie benötigt zwar einen Umformer, macht aber wegen ihrer niedrigen Drehzahl ein Getriebe entbehrlich. Es sind Maschinen bis zu 12000 kW und Leistungen von 10000 t aus 800 m Teufe täglich in Betrieb. Die Geschwindigkeit in der mittleren Wegstrecke tiefer Schächte liegt bei 22 m/s mit 30 t Nutzlast. Der Fördervorgang wird wesentlich vom Fahrtregler beeinflußt. Dieser bestimmt die Fördergeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Fahrweg und begrenzt insbesondere die Beschleunigung nach oben und unten. Außerdem besitzt jede Maschine einen Teufenanzeiger. Das ist eine Spindel mit Wandermutter, deren Lage den jeweiligen Stand der Körbe im Schacht wiedergibt. Dieses Gerät ist auch mit einer Übertreibsicherung verbunden. Diese löst eine zweite Bremse (Fallgewichtsbremse) aus, falls ein Korb zu hoch und der Gegenkorb zu tief fährt. Durch Zusammenziehen der Spurlatten im Schachtrumpf und Verdickung dieser Latten im oberen Teil des Förderturms wird der Korb im Falle eines Übertreibens, mit gewisser Verzögerung abgebremst. Förderseile bestehen aus kaltgezogenen Stahldrähten von 2,5 mm Durchmesser und 200 kp/mm^2 Zugfestigkeit, die zu Litzen verdreht und ihrerseits wieder verseilt sind (Abb. 4). Seile bis zu 100 mm Durchmesser und Bruchlasten bis zu 720 Mp sind normalerweise im Gebrauch.
Als Schachtfördermittel kennt man das Gestell (den Korb), eine mehretagige Lochstahlblechkonstruktion, auf die die Förderwagen mechanisch aufgeschoben und mechanisch ausgedrückt werden. Sie macht ein jeweiliges Umsetzen an den einzelnen Anschlagsorten erforderlich. Die Körbe dienen auch der Ein- und Ausfahrt der Bergleute. Als andere Einrichtung benutzt man in zunehmendem Maße Gefäße (Skips, Abb. 5). Sie werden unter Tage über Fülltaschen automatisch beschickt und über Tage automatisch entleert. Gefäßförderung erspart sowohl das Heben der durch das Förderwagengewicht gebildeten Totlast als auch das Umsetzen. Zum Fördervorgang unterscheidet man zwei Systeme: die Trommelförderung, bei der mit dem auf der Trommel sich auf- und abwickelnden Seil jeder beliebige Anschlagpunkt (z. B. mehrere Sohlen) bedient werden kann, und die Treibscheiben-(Koepe-)Förderung (Abb. 2), bei der beide Körbe am selben Seil hängen, das nur durch die Reibung auf einer elektromotorisch angetriebenen Scheibe bewegt wird. Zum Seilgewichtsausgleich verwendet man konische Trommeln (Abb. 3). Tiefe Schächte besitzen wegen der erheblich kürzeren Seillänge Treibscheibenförderung. Schließlich gibt es neben Einseil- auch Mehrseilförderungen. Abzug der Förderwagen oder Entleerung der Skips findet stets im oberen Drittel des Turmes statt; damit wird freie Höhe für den anschließenden Aufbereitungsprozeß gewonnen (s. S. 118ff.).

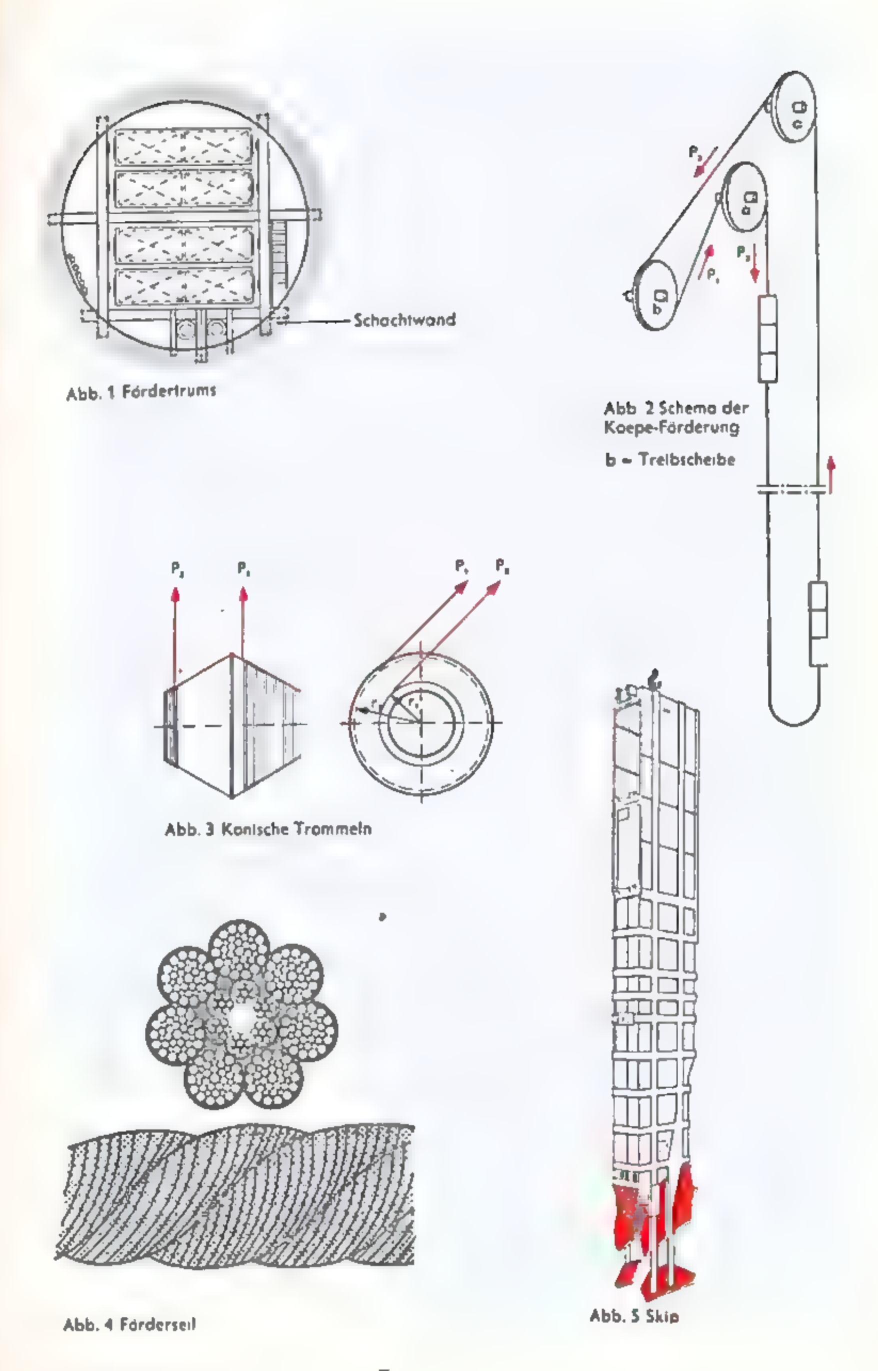


Abb. 1 Fördertrums

Abb. 2 Schema der Koepe-Förderung

Abb. 3 Konische Trommeln

Abb. 4 Förderseil

Abb. 5 Skip

BERGWERKSBELÜFTUNG

Mit Wetter bezeichnet der Bergmann die Grubenluft, mit Wetterführung die planmäßige Lenkung der in ein Bergwerk einziehenden atmosphärischen Frischluft zu den einzelnen Betriebsstellen, bis zu einem ausziehenden Wetterschacht. Die Wetterführung dient drei Zwecken: der Atmung, der Verdünnung auftretender schädlicher Gase (einschließlich der Nachschwaden der Schießarbeit) und der Kühlung der Gesteinswärme. Letztere steigt mit zunehmender Teufe im Mittel bei je 30 m um 1 °C. Im einfachen Stollenbau genügt zumeist der natürliche Wetterzug durch Ausnutzung des Niveau- und damit Luftdruckunterschiedes zwischen 2 Grubenöffnungen verschiedener Meereshöhenlage (Kaminwirkung). Es ergibt sich dabei eine jahreszeitlich bedingte Umstellung der Strömungsrichtung (Abb. 1). Mittelbar spielt bei jeder Belüftungsart auch die Diffusion (Gasaustausch) eine Rolle: Stollen großen Querschnittes (Tunnel) können auf diese Weise bis über 100 m ohne künstliche Bewetterungsmaßnahmen vorgetrieben werden. Auch die Abluft betriebener Preßluftgeräte wirkt sich vorteilhaft aus.

Im echten Tiefbau werden in allen Fällen Ventilatoren mit teilweise beträchtlichen Ausmaßen notwendig. In großen Steinkohlenbergwerken werden bis zu 20000 m^3 Luft je Minute von ihnen angesaugt. Sie stehen an den ausziehenden Wetterschächten am äußeren Rande eines Grubenfeldes, während in dessen zentralem Teil ein oder zwei einziehende Hauptförderschächte liegen. Bei jeder Bewetterungsweise wird das oben erwähnte Kaminprinzip weitestgehend ausgenutzt, das heißt, die Frischwetter fallen in ihrer Hauptmenge bis zum Grubentiefsten (unterste Sohle) ein, erfahren hier durch die von der Gebirgswärme verursachte Volumenvergrößerung (bewirkt Gewichtsverminderung) eine Auftriebstendenz und geraten nach längerem oder kürzerem Strömungsweg in den Sogbereich des ausziehenden Hauptwetterweges oder -schachtes, in dem Unterdrücke bis zu 400 mmWS herrschen. Die Verteilung des Frischstromes auf die einzelnen Sohlen, Hauptfeldstrecken, Querschläge, Abbaustrecken und Gewinnungsorte erfolgt mittels Wettertüren (als Schleusen ausgebildet), Wetterdämmen, Wetterkreuzen und anderen Vorkehrungen, die nach errechnetem und überwachtem Mengenbedarf der einzelnen Grubenräume eingesetzt werden (Abb. 2 und 3).

Zu den Grundlagen planmäßiger Wetterführung gehören zeichnerische Wetterstammbäume, die sowohl für das gesamte Grubengebäude als auch für jede Betriebsabteilung getrennt entworfen und an untertägigen Wettermeßstationen kontrolliert werden. Dabei ist eines der nicht zuletzt auch grubensicherheitlich verlangten Erfordernisse, den Hauptstrom in möglichst viele in sich geschlossene Teilströme zu unterteilen (Abb. 2 und Abb. 3). Ein Hauptanliegen der wetterwirtschaftlichen Grubenüberwachung ist die Ausschaltung sogenannter Wetterkurzschlüsse. Hierunter werden Wetterverluste verstanden, die dadurch entstehen, daß die vorerwähnte Depression, in die die Grubenluft gerät, diese zur Benutzung eines kürzeren Weges veranlaßt als betrieblich und sicherheitshalber erforderlich. Grubenräume, die von einem der Teilströme der Hauptfrischluftzufuhr nicht erreicht werden können, bedürfen der sogenannten Sonderbewetterung. Sie erfolgt durch Einbau von Rohrleitungen großer lichter Weite (Lutten) und zwischengeschalteter Lüfter (mittlere Leistung 150 m^3/min) mit Anschluß an einen benachbarten Teilstrom. Die Sonderbewetterung stellt ein eigenes, gesondert und sorgfältigst zu kontrollierendes System dar. Es kann auf saugende oder blasende Luftbewegung oder auf beide Arten zugleich abgestellt sein (Abb. 4).

Klimaanlagen vermögen zwar Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt der Wetter zu senken, sind indessen wegen ihrer hohen Kosten in Bergwerken nur selten anzutreffen (z. B. beim Goldbergbau in Südafrika).

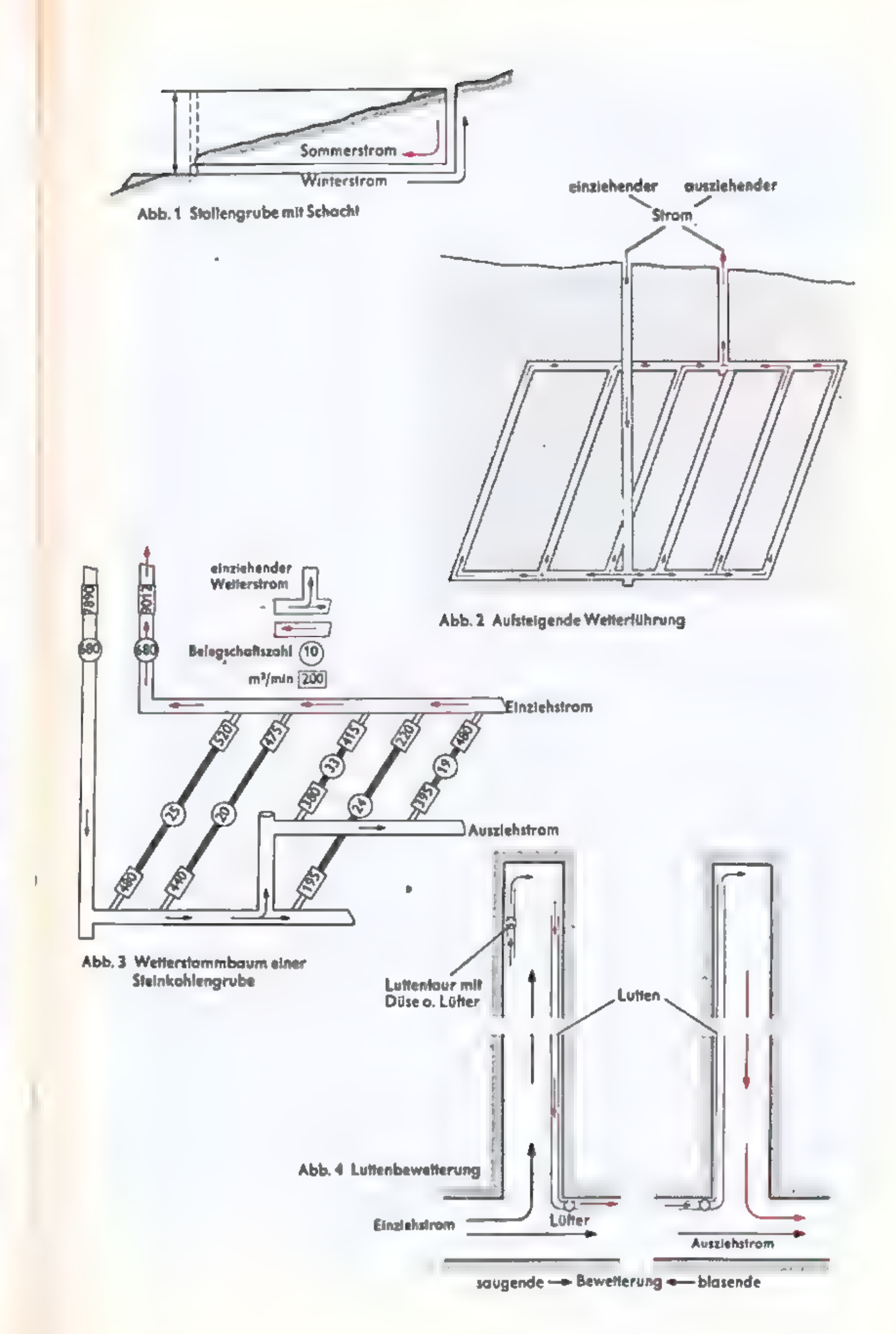


Abb. 1 Stollengrube mit Schacht

Abb. 2 Aufsteigende Wetterführung

Abb. 3 Wetterstammbaum einer Steinkohlengrube

Abb. 4 Luttenbewetterung

SCHLAGWETTERBEKÄMPFUNG

Je Tonne geförderter Steinkohle treten bis zu 200 m^3 Grubengas (Methan = CH_4) aus; der Mittelwert des Ruhrreviers beträgt 30 m^3. Bei einem Anteil von 4,5% bis 14,5% dieses farb-, geruch- und geschmacklosen Gases in den Grubenwettern ist das Gas-Luft-Gemisch explosibel. Es hat bei mehreren Unglücken mit jeweils über tausend Toten die Ursache für die verheerendsten Katastrophen in der Geschichte der industriellen Wirtschaft der Welt abgegeben. Darunter finden sich Fälle, in denen die gesamte Untertageschichtbelegschaft ums Leben gekommen ist. Meist geschahen die Unglücke dadurch, daß im unmittelbaren Anschluß an die schlagenden Wetter ein Kohlenstaub-Luft-Gemisch explodiert ist. Das hierbei entstehende hochgiftige Kohlenmonoxid (CO) hat das restliche menschliche Leben vernichtet. Dem Explosionsvorgang liegt folgende Reaktion zugrunde:

$$CH_4 + 2O_2 + 8N_2 \rightarrow CO_2 + 8N_2 + 2H_2O.$$

Für Kohlenstaub-Luft-Gemische liegt bei reinem Fettkohlenstaub die untere Explosionsgrenze bei 70 g/m^3 Grubenluft, die obere bei 1000 g/m^3.

Hauptanliegen aller grubensicherheitlichen Forschung, Überwachung und Gesetzgebung in den kohlefördernden Ländern der Erde ist daher die Suche und Vervollkommnung vorbeugender Maßnahmen gegen Grubenunglücke solcher Art. Dabei beziehen sich diese vielfältigen und weitreichenden Einwirkungen auf das Bergwerksgeschehen im wesentlichen darauf, jede Ursache einer Zündungsmöglichkeit solch explosibler Gemische auszuschließen. Die Entgasung (Ausgasung) der Kohle und ihres Nebengesteines ist naturgegeben (Abb. 1) und kann, abgesehen von den seltenen Fällen vorausgehender planmäßiger Methanabsaugung, so gut wie überhaupt nicht gemindert oder in wirksame Kontrolle gebracht werden. Besondere Abbaugestaltung, die Verhiebgeschwindigkeit, vollständige Versatzdichte ausgekohlter Räume u. a., vermögen einen günstigen Einfluß auszuüben. Entscheidend bleiben aber vorschriftsmäßige Arbeits- und Verhaltensweise des einzelnen Mannes und die mannigfaltigen betriebstechnischen Vorkehrungen, die den Ausschluß von Funken- oder Flammerscheinungen gewährleisten, wie die strikte Innehaltung des Verbotes von Rauchen und offenem Feuer u. a. m. Die wesentlichste grubenseitige Maßnahme ist ständige zuverlässige Versorgung mit so großen Frischluftmengen, daß an jedem Ort eine Verdünnung etwa auftretenden Methans weit unterhalb der Gefahrengrenze sichergestellt ist. Den ersten großen Erfolg in der Bekämpfung schlagender Wetter hat die Erfindung der Benzinwetterlampe durch den englischen Physiker Davy 1816 gebracht (Abb. 2). Durch ihr engmaschiges Metalldrahtsieb schlägt, infolge seiner abkühlenden Wirkung, eine Flamme auch dann nicht durch, wenn brennbares Gas außerhalb des Drahtkorbes ansteht. Die Lampe dient zugleich dem Nachweis von Methan durch Aureolenbildung über der Benzinflamme. Die Höhe dieser blauvioletten Aureole ist ein Maßstab für den Prozentgehalt an Grubengas in den Wettern (Abb. 3). Dem gefährlichen Ablagern und möglichen Hochwirbeln von Kohlenstaub in den Gruben wird überwiegend durch das sogenannte Einstauben begegnet. Ein feinstgemahlener Kalksteinstaub, der bezüglich Korngröße, Flugfähigkeit, Trockenheitsgrad und dem Gehalt an entflammbaren Bestandteilen hohen Gütevorschriften entsprechen muß, wird im ganzen Grubengebäude in dicker Schicht mechanisch aufgestreut und insbesondere vor jedem Schießen neu eingebracht. Der gleiche Staub dient als bemerkenswertestes und wirksamstes Mittel der örtlichen Lokalisierung etwaiger Explosionen. Er wird zu diesem Zweck in vorgeschriebenen Mengen auf leicht kippbaren Bühnen (Abb. 4) gelagert, die begrenzte Abbauabteilungen, Flözstreben usw. abriegeln. Ein Explosionsstoß wirft den Staub sofort herab und aufgewirbelt bildet er eine dichte Wolke, die den Stoß abdämpft und wegen der abkühlenden Wirkung des Gesteinsstaubes die Flamme erstickt.

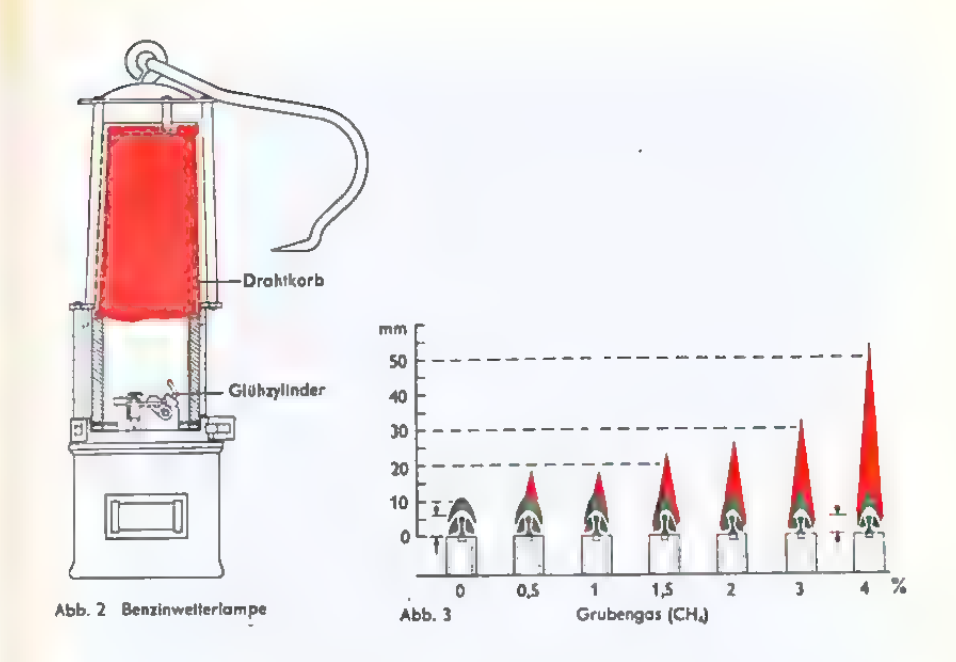


Abb. 2 Benzinwetterlampe

Abb. 3

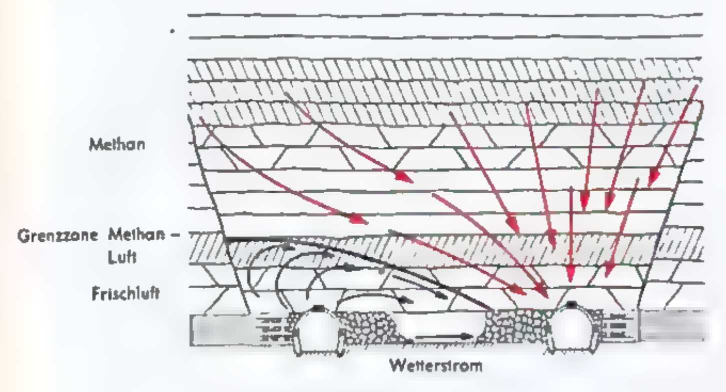


Abb. 1 Methangasströmung

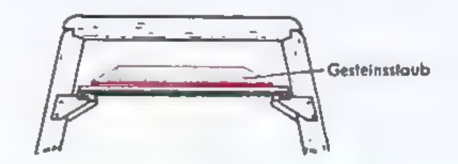


Abb. 4 Gesteinsstaubsperre (Einbrettbühne)

MINERALAUFBEREITUNG I

Erze sind nur in seltenen Fällen so, wie sie aus dem Bergwerk kommen, für die Verhüttung auf das jeweilige Metall geeignet. Häufig haben sie nur geringe Metallgehalte (z. B. 0,8 % Cu oder etwa 5 % Pb), oder sie sind aus Mineralien verschiedener Metalle zusammengesetzt, deren hüttenmännische Aufarbeitung unterschiedliche Verfahrensgänge erforderlich macht ($PbS + ZnS$). Deshalb werden die meisten Erze vorbereitenden Prozessen zur Abtrennung eines Teils des unhaltigen Materials (Gangart) bzw. zur Trennung der Mineralien verschiedener Metalle, den sogenannten Aufbereitungsverfahren, unterworfen. Die Aufbereitung bedient sich ausschließlich mechanisch-physikalischer Arbeitsweisen, indem sie die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Mineralien ausnutzt. Die Aufbereitungsanlagen befinden sich zumeist bei den Bergwerken, um den Transport zur Hütte nicht mit den Frachtkosten für das taube Gestein zu belasten. Für die mechanische Zerlegung des Fördererzes ist es Voraussetzung, daß vor dem eigentlichen Aufbereiten die einzelnen zumeist fest miteinander verwachsenen Mineralbestandteile voneinander gelöst, d. h. „aufgeschlossen" werden. Dies geschieht durch Zerkleinern in Brechern und Mühlen verschiedener Typen (Abb. 1). Das Maß der Zerkleinerung ist abhängig von der Größe der Erzmineralien, dem natürlichen Verwachsungsgrad, aber auch von den Anforderungen des nachfolgenden speziellen Aufbereitungsverfahrens. Ein vollständiger Aufschluß ist praktisch nicht möglich, da ein Teil der feinstverwachsenen Mineralien unaufgeschlossen bleibt und die Körner des Brechgutes nicht immer genau entlang den Korngrenzen der miteinander verwachsenen Mineralien aufgespalten werden. Bei der Aufbereitung spielt die Klassierung, d. h. die Sortierung des zerkleinerten Gutes nach der Korngröße, eine wichtige Rolle. In vielen Fällen werden im Zuge der Zerkleinerung zur Entlastung der Zerkleinerungsmaschinen die genügend vorzerkleinerten Erzanteile durch Roste oder Siebmaschinen ausgeschieden. Die meisten Aufbereitungsverfahren verlangen ein mehr oder weniger vorklassiertes Aufgabegut. Bei gröberen Körnungen geschieht die Klassierung mittels Siebmaschinen, bei feinerem Gut, etwa unter 1 mm, wird der Siebvorgang zu wenig leistungsfähig. Deshalb erfolgt die Klassierung im Wasserstrom unter Ausnutzung der verschiedenen Fallgeschwindigkeiten der Körner (Abb. 5).
Die Aufbereitung erfolgt im wesentlichen nach drei grundsätzlich voneinander verschiedenen Verfahren:
Die naßmechanische oder Schwerkraftaufbereitung. Hierbei nutzt man die unterschiedlichen spezifischen Gewichte der Mineralien aus. In der Regel sind die Schwermetallmineralien – Sulfide und Oxide – spezifisch beträchtlich schwerer als die unhaltige Gangart. Auch zeigen die einzelnen Metallträger häufig solche Gewichtsunterschiede, daß Trennung nach dem spezifischen Gewicht möglich ist. Die Trennungsvorgänge spielen sich im bewegten Wasserstrome ab, wobei die sich aus den jeweiligen spezifischen Gewichten ergebenden unterschiedlichen Fallgeschwindigkeiten und Fallwege die Trennung herbeiführen (Abb. 6).
Die gröberen Körnungen von etwa 30 bis 0,5 mm werden in sogenannten Setzmaschinen im rhythmisch auf- und niedergehenden, in horizontaler Richtung fließenden Wasserstrom „gesetzt". Die feinen Sande und Schlämme, etwa unter 0,3 bis 0,5 mm, werden auf sogenannten „Herden", zumeist Stoß- und Schüttelherden, verarbeitet. Das sind Apparate mit großen, leicht geneigten Blechen, auf denen das Gut unter dem Einfluß des über sie hinweggehenden flächenhaft dünnen Wasserstromes verteilt und dabei in haltiges (schweres) und unhaltiges (leichtes) Korn getrennt wird. Bei den Stoß- und Schüttelherden (Abb. 4) kommt noch eine stoßartige Rüttelbewegung der Herdtafel hinzu.

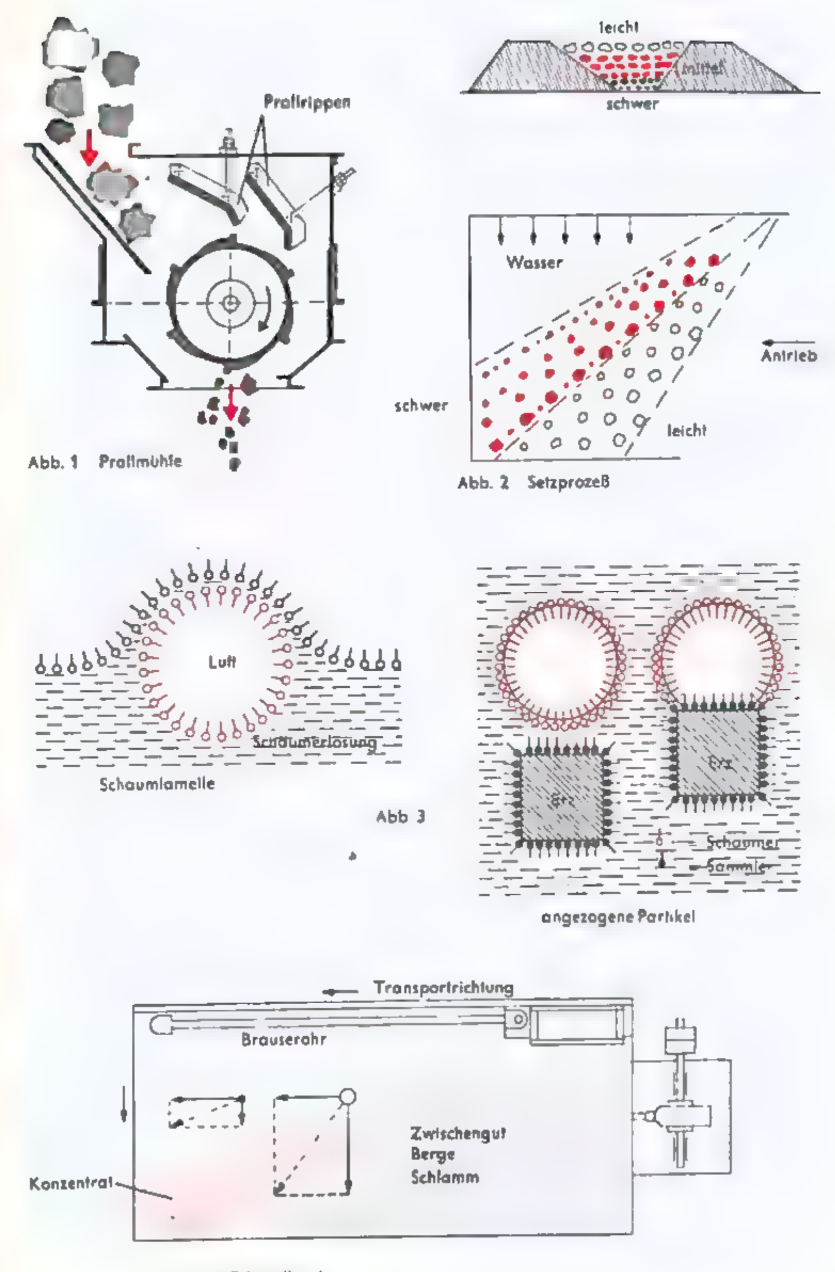


Abb. 1 Prallmühle

Abb. 2 Setzprozeß

Abb. 3

Abb. 4 Schüttelherd

MINERALAUFBEREITUNG II

Die *Flotation* nutzt die Tatsache aus, daß die im feingemahlenen Erz vorliegenden Mineralien teils benetzbar, teils wasserabstoßend sind (Abb. 3 und 7). Die wasserabstoßenden – hydrophoben – Teilchen haben eine deutliche Affinität zur Luft. In das Feststoff-Wasser-Gemisch, die Trübe, eingebrachte feinverteilte Luft hängt sich in Blasenform an diese Teilchen und bringt sie zum Aufschwimmen. Die auf diese Weise sich in einem Schaum an der Oberfläche sammelnden hydrophoben Erzbestandteile werden durch eine einfache Abstreichvorrichtung abgehoben. Die wasserbenetzbaren – hydrophilen – Bestandteile des Erzes verbleiben unbeeinflußt in der Trübe. Zumeist sind es die wertlosen Mineralien – Gangart –, die im Schlamm ausgetragen werden. Die stärkste Schwimmfähigkeit haben die Sulfide der Schwermetalle. Deshalb hat die Flotation die größte Bedeutung bei Kupfer-, Blei- und Zinkerzen erlangt. Ein ganz wesentlicher Fortschritt ergab sich aus der Möglichkeit, Erze mit zwei oder mehreren nutzbaren Mineralien selektiv zu flotieren, d. h. die Mineralien der verschiedenen Metalle voneinander zu trennen und in gesonderten „Konzentraten" zu sammeln. Hiervon wird vor allem bei der Aufbereitung sulfidischer Blei-Zink-Erze Gebrauch gemacht.

Die Steuerung der Oberflächeneigenschaften der Mineralien erfolgt durch geringfügige Zusätze von chemischen Stoffen. Man unterscheidet grundsätzlich folgende Gruppen von Schwimmitteln:

Schäumer: Sie haben die Aufgabe, die in die Trübe durch Rühren oder Druckluft eingebrachten Luftblasen zu einem stabilen tragfähigen Schaum zu verbinden. Als Schäumer finden ölartige Produkte Verwendung.

Sammler: Sie verursachen die eigentliche wasserabstoßende Wirkung und machen das Erzteilchen für die Anlagerung der Luftblase geeignet. Meist sind es synthetisch hergestellte organische Verbindungen.

Regelnde Schwimmittel: Sie ermöglichen es, hydrophobe Mineralien vorübergehend hydrophil zu machen, zu passivieren (Drücker) und anschließend wieder zu beleben, zu aktivieren (Beleber). Daher sind sie für die selektive Flotation von ausschlaggebender Bedeutung. Die regelnden Schwimmittel sind durchweg anorganische Verbindungen, meist Salze.

Die Flotation ist heute das beherrschende Aufbereitungsverfahren und spielt für die Metallversorgung der Welt eine ausschlaggebende Rolle, weil sie die Verarbeitung armer, komplexer und feinverwachsener Erze gestattet, auf die infolge der Erschöpfung der reichen Lagerstätten immer mehr zurückgegriffen werden muß.

Magnetscheidung: Bringt man aufgemahlenes und klassiertes Erz in den Bereich elektromagnetischer Felder, so kann man die magnetischen Bestandteile herausziehen und von den nichtmagnetischen abtrennen. Die hierfür konstruierten Apparate werden als Magnetscheider bezeichnet. Naturgemäß spielt die Magnetscheidung die größte Rolle bei Eisen- und Manganerzen. Stark magnetische Eisenmineralien wie Magnetit können im schwachen Magnetfeld geschieden werden, während die große Gruppe der schwachmagnetischen Mineralien starke Magnetfelder – Starkfeldscheider – benötigt. Es sind jedoch Verfahren entwickelt worden, auch die magnetischen Eigenschaften der Eisenmineralien durch geeignete thermische Vorbehandlung in den schwachmagnetischen Eisenerzen wesentlich zu erhöhen. So wird beim Spateisenstein durch Austreiben der Kohlensäure im Schachtofen das Karbonat in das starkmagnetische Eisenoxyduloxid umgewandelt. Die Rot- und Brauneisenerze werden durch magnetisierende Röstung im Drehrohrofen in eine starkmagnetische Modifikation übergeführt und sodann magnetgeschieden (Abb. 8).

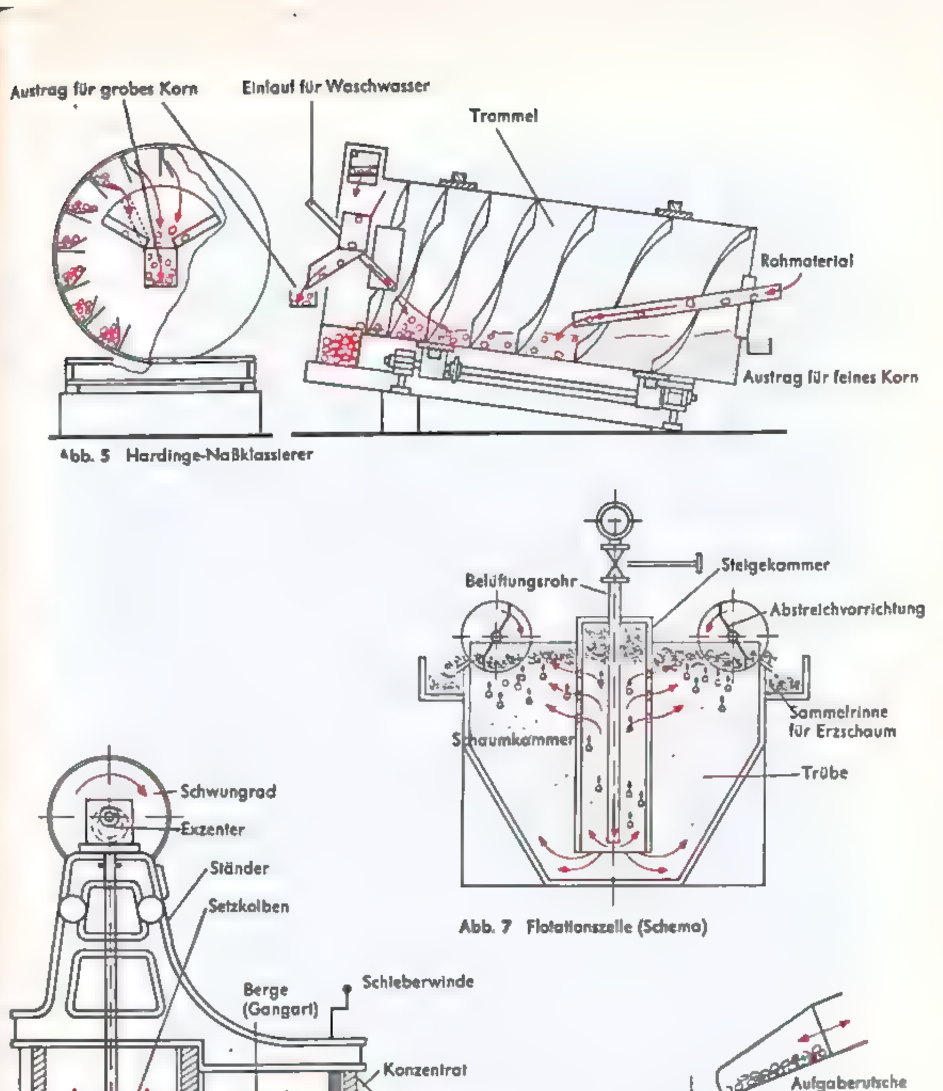


Abb. 5 Hardinge-Naßklassierer

Abb. 7 Flotationszelle (Schema)

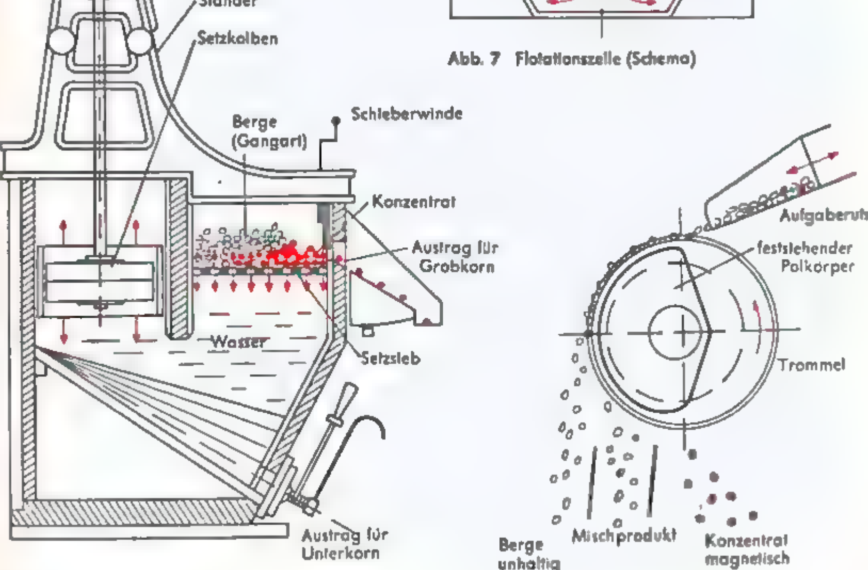


Abb. 6 Kolbensetzmaschine

Abb. 8 Elektromagnetischer Trommelscheider

ROHEISENERZEUGUNG I

Im *Hochofen* wird aus dem Möller (Erze, Sinter, Pellets, Zuschläge) und Koks Roheisen erschmolzen. Der Hochofen (s. Abb. 2) ist ein Schachtofen mit kreisförmigem Querschnitt. Vom oberen Ende, der Gicht, erweitert sich der den größten Teil des Hochofens ausmachende leicht kegelstumpfförmige Schacht bis zu dem zylindrischen Kohlensack. Daran schließt die sich nach unten verengende kegelstumpfförmige Rast an, die in das zylindrische Gestell übergeht. Der gesamte Hochofen ist mit einem Stahlpanzer versehen. Schacht und Rast sind mit feuerfestem Schamottemauerwerk von etwa 500—1000 mm Wandstärke, das Gestell und der Gestellboden mit Kohlenstoffsteinen ausgekleidet. Um die Haltbarkeit der Ausmauerung des Hochofens zu gewährleisten, werden der Schacht und häufig auch die Rast mit wasserdurchflossenen Kühlkästen, das Gestell durch Wasserberieselung gekühlt. Die Ofenhöhe (Ofensohle bis Gichtbühne) beträgt 30—45 m, der Gestelldurchmesser 3,5—12,4 m (14 m gegenwärtig geplant).
Die Hochofeneinsatzstoffe werden in einer Bunkeranlage zwischengelagert. Mit Förderbändern oder über einen Möllerwagen gelangen abgewogene Möller- und Koksmengen in Senk- oder Kippkübel, die über einen Schrägaufzug zur Gicht des Hochofens befördert werden. Möller und Koks werden im allgemeinen lagenweise aufgegeben (gegichtet).
Von Gasgebläsemaschinen und Turbogebläsen erzeugter Kaltwind (Kaltluft) mit einem Druck von etwa 1,6 atü wird wechselweise in drei *Winderhitzern* (Cowpern; s. Abb. 4) mit innen- oder außenliegendem Brennschacht bis auf 1300° C vorgewärmt. Jeweils zwei Winderhitzer werden durch Verbrennung von gereinigtem Gichtgas oder Öl aufgeheizt, während bei dem dritten eingeblasene Kaltluft zur Vorwärmung durch das heiße Mauerwerk geleitet wird. Am oberen Gestellrand wird der Heißwind durch Blasformen (je nach Ofengröße bis zu 36) in den Hochofen eingeblasen. Das vor den Blasformen entstehende Gas durchströmt die nach unten wandernde Beschickung, wird dabei chemischen Veränderungen unterworfen und an der Gicht des Hochofens als Gichtgas (Temperatur 100—250° C) abgezogen. Um das Entweichen von Gichtgas zu vermeiden, wird der Hochofen an der Gicht durch zwei Verschlüsse (Gichtglocken) abgeschlossen, die während des Betriebes niemals gleichzeitig geöffnet werden.
Der Koks liefert das erforderliche Reduktionsgas, stützt die Möllersäule und lockert sie auf. In zunehmendem Maße wird heute die durch seine Verbrennung gelieferte Heizwärme durch über die Blasformen eingeblasenes Öl oder Erdgas sowie erhöhte Heißwindtemperaturen ersetzt. Mit reinem Sauerstoff angereicherter Heißwind trifft vor den Blasformen auf glühenden Koks, an dem das primär gebildet CO_2 zu Kohlenmonoxid reduziert wird ($CO_2 + C = 2\,CO$). Der beim Durchgang durch den Hochofen chemisch unverändert bleibende Stickstoff des eingeblasenen Windes gibt einen Teil seiner im Gestell aufgenommenen Wärme an die niedergehende Beschickung ab und ist daher als Wärmeüberträger noch unentbehrlich. Erze, Zuschläge (v. a. Kalkstein) und Koks werden auf ihrem Wege durch den Hochofen erhitzt (s. Hochofenzonen Abb. 1), wobei zunächst die anhaftende Feuchtigkeit verdampft; bei etwa 300° C wird das Hydratwasser abgespalten ($Fe_2O_3 \cdot H_2O \rightarrow Fe_2O_3 + H_2O$).

Abb. 1 Hochofenzonen

Abb. 2 Gesamtanlage

ROHEISENERZEUGUNG II

Weiter unten dann im Hochofen im Temperaturbereich von 600° C bis 1000° C findet die Carbonatzersetzung statt ($FeCO_3 \rightarrow FeO + CO_2$; $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$) und läuft vor allem die wichtige indirekte Reduktion ab. Dabei reduziert das Kohlenmonoxid bei seinem Aufsteigen durch die Beschickungssäule die oxidischen Eisenminerale zu niederen Oxiden und schließlich teilweise auch zu metallischem Eisen, wobei sich Kohlendioxid bildet ($3\,Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2\,Fe_3O_4 + CO_2$; $FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2$). Die indirekte Reduktion ist jedoch nicht vollständig, weil die Fähigkeit des CO, den Erzsauerstoff abzubauen, mit steigendem CO_2-Gehalt und fallender Temperatur abnimmt. Der nicht durch die indirekte Reduktion entfernte Sauerstoff wird im unteren Teil des Hochofens im Bereich höherer Temperaturen durch direkte Reduktion abgebaut. Sie geschieht mit festem Kohlenstoff unter Bildung von CO_2, das sofort mit dem Kokskohlenstoff zu CO reagiert. Sobald metallisches Eisen entstanden ist, wird es aufgekohlt, d. h., Kohlenstoff löst sich im Eisen. Der Schmelzpunkt des reinen Eisens wird dadurch erniedrigt.

Im heißesten Teil des Hochofens vollzieht sich das Schmelzen des aufgekohlten Eisens und die Bildung der Schlacke aus der Gangart der Erze, des Sinters, der Pellets, der Zuschläge und des Kokses. Nach der Art des zu erzeugenden Roheisens richtet sich das Verhältnis von basischen (CaO, MgO) zu sauren Bestandteilen (SiO_2, Al_2O_3) im Möller und damit auch in der Schlacke. Zusammensetzung und Temperatur der Schlacke bestimmen die Reduktion des Mangans, Siliciums, Phosphors und anderer Elemente aus deren Oxiden und damit deren prozentualen Gehalt im Roheisen. Insbesondere soll der vor allem vom Koks eingebrachte Schwefel von der Schlacke in Form von CaS aufgenommen werden, was einen erhöhten Anteil von CaO erforderlich macht (basische Schlacke). Bei eisenarmen Erzen mit einem hohen Gehalt an Kieselsäure würde jedoch ein zu hoher Kalksteinzuschlag erforderlich sein. In einem solchen (selten vorkommenden) Fall arbeitet man mit einer Schlacke mit einem höheren Anteil an Kieselsäure (saure Schlacke). Dabei ist die Roheisenentschwefelung ungenügend und muß später außerhalb des Hochofens (meistens mit Soda) nachgeholt werden. Die Schlackenmenge schwankt zwischen 200 und 1000 kg/t Roheisen.

Die Leistung eines Hochofens hängt in erster Linie von der Verbrennungsgeschwindigkeit des Kokskohlenstoffes vor den Blasformen und damit vom Koksdurchsatz ab, der von der Ofengröße, d. h. hauptsächlich vom Gestelldurchmesser, beeinflußt wird. In gleicher Weise bestimmen Ofengang, Eisengehalt des Möllers und Art des erschmolzenen Roheisens die Hochofenleistung.

Das Roheisen (Temperatur 1390—1440° C) wird in fahrbare Pfannen (Abb. 3) abgestochen (Eisenabstichloch s. Abb. 5). Stahl- und Thomasroheisen werden flüssig zur Weiterverarbeitung zu den Stahlwerken gefördert. Die Spezialroheisensorten, manganreiches Stahleisen, Spiegeleisen, Hämatitroheisen und Gießereiroheisen, vergießt man in den allermeisten Fällen über eine Gießmaschine zu Masseln. Ferromangan und Ferrosilicium erstarren in Sandbetten zu großen Riegeln oder Barren. Hämatit- und Gießereiroheisen finden in Eisengießereien zur Herstellung von Gußstücken Verwendung. Stahleisen, Ferromangan und Ferrosilicium dienen den Stahlwerken zur metallurgischen Veredelung von Stahl. Die Hochofenschlacke läuft ebenfalls in fahrbare Pfannen (Abb. 4). Man läßt sie meistens in Schlackenbetten erstarren und verarbeitet sie zu Straßenbelag, Eisenbahnschotter, Mauersteinen, Pflastersteinen, Schlackenwolle, Hochofenzement u. a. Das Hochofengas (Gichtgas) gelangt von der Gicht des Hochofens nach Grobreinigung in Staubsäcken und Wirblern durch die Rohgasleitung zur Gichtgasreinigung. Dort wird es in Naßwäschern und Elektrofiltern vom Gichtstaub (feinste Teilchen des Möllers) befreit.

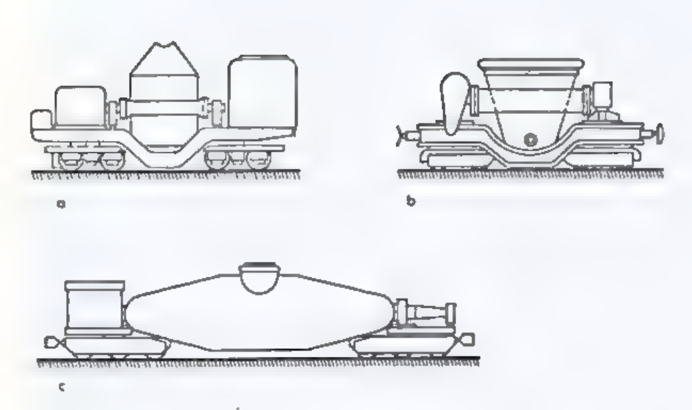


Abb 3
Pfannen für den Roheisentransport

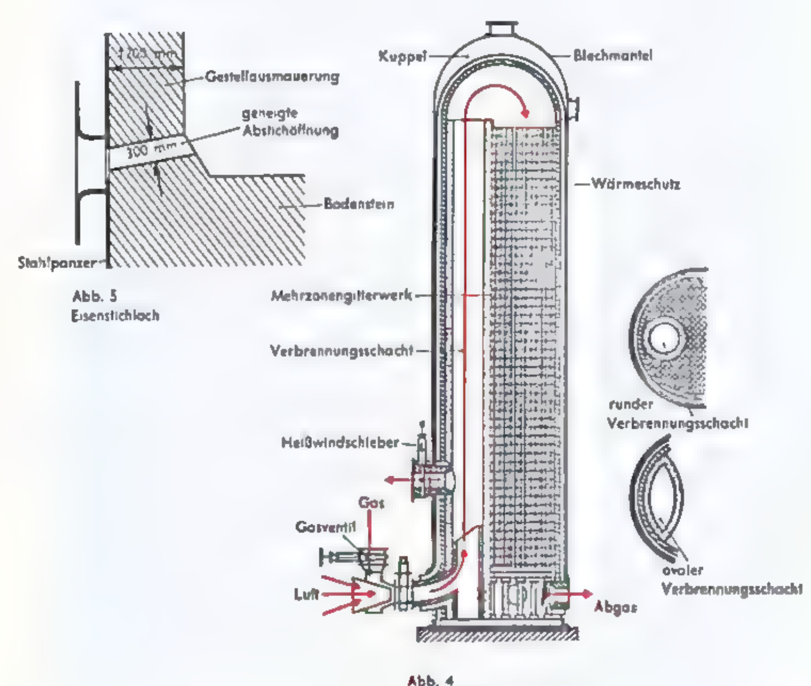


Abb. 5
Eisenstichloch

Abb. 4
Winderhitzer

STAHLHERSTELLUNG I

Stahl unterscheidet sich von Roheisen durch seinen geringeren Gehalt an Kohlenstoff. Stahlherstellung ist daher nichts anderes als die Verbrennung des im Eisen enthaltenen Kohlenstoffs; dadurch wird das Gefüge elastischer, biegsamer und — was sehr wesentlich ist — schneidbar. Stahl ist widerstandsfähiger und daher besser weiterzuverarbeiten als Eisen.

Neben dem Kohlenstoff enthält Roheisen noch weitere Beimengungen, die seine Eigenschaften ungünstig beeinflussen, z. B. Schwefel und Phosphor. Alle diese Stoffe werden durch das sogenannte Frischen aus dem Roheisen entfernt. Dabei wird Luft mit dem flüssigen Metall in Berührung gebracht, wodurch die genannten Stoffe verbrannt, d.h. durch den in der Luft enthaltenen Sauerstoff in ihre Oxide umgewandelt werden. Diese Oxide sind leichter als der flüssige Stahl und schwimmen daher als flüssige Schlacke obenauf; man muß sie vor dem Abstechen des Stahles ablaufen lassen.

Herstellung von Siemens-Martin-Stahl

Das Kernstück des Stahlwerkes, das diesen Stahl herstellt, ist der Siemens-Martin-Ofen (Abb. 1a). In die Herdmulde werden das Roheisen und der zu verarbeitende Schrott in fester Form durch einen Kran eingebracht. Dann wird oberhalb dieser Mulde ein Gas-Luft-Gemisch entzündet; bei der Temperatur von rd. 1800°C schmilzt das Eisen. Das zur Verbrennung verwendete Gas wird dabei durch eine Regenerativfeuerung vorgewärmt. Dabei strömt das Gas zusammen mit der zur Verbrennung notwendigen Luft auf der einen Seite des Ofens ein und wird in der heißen Heizkammer vorgewärmt. Über der Herdmulde verbrennt dieses Gas-Luft-Gemisch; die heißen Abgase strömen durch Kanäle auf der anderen Seite des Ofens zum Schornstein. Einen großen Teil ihrer Wärme geben sie jedoch vorher an ausgemauerte, zunächst kalte Heizkammern ab. Die Ausmauerung besteht aus feuerfesten Steinen, die auf Rotglut erhitzt werden. Dann wird die Gaszufuhr umgesteuert (Regenerativfeuerung), d.h., der Eintritt erfolgt nun durch die jetzt heißen Kammern, die ihre Wärme an das einströmende Gas und die Luft abgeben und diese stark anwärmen. Dadurch kann man die Brenntemperatur der Flamme stark erhöhen (Abb. 1b). Die Luft, die man zum Frischen, also zur Oxydierung der unerwünschten Beimengungen des Roheisens braucht, wird der Verbrennungsluft entnommen. Wegen des Herdcharakters des Siemens-Martin-Ofens spricht man hierbei von Herdfrischen.

Die bei diesem Verfahren entstehende Schlacke, die aus den Oxiden der Verunreinigungen und Beimengungen zusammengesetzt ist, schwimmt in flüssigem Zustand auf der Stahlschmelze, wird von dort abgestochen und bildet im erkalteten und gemahlenen Zustand wegen ihres hohen Phosphorgehaltes ein wertvolles Düngemittel. Wichtig sind auch die Eigenschaften des Futters, d.h. der zur Ausmauerung der Herdmulde verwendeten feuerfesten Steine. Diese sollen nämlich einen Teil des im Eisen enthaltenen Schwefels und Phosphors aufnehmen können.

Herstellung von Thomas-Stahl

Die Verminderung des Kohlenstoffgehaltes des Roheisens geschieht bei diesem Verfahren nicht in einem Ofen, sondern in einem großen, birnenförmigen, 20–60 Tonnen enthaltenden Gefäß, der Thomasbirne (Abb. 2) oder dem Thomaskonverter. Diese Birne ist aus starken Stahlblechen zusammengenietet und innen in einer Stärke von etwa $^1/_2$ m mit feuerfesten Steinen ausgekleidet.

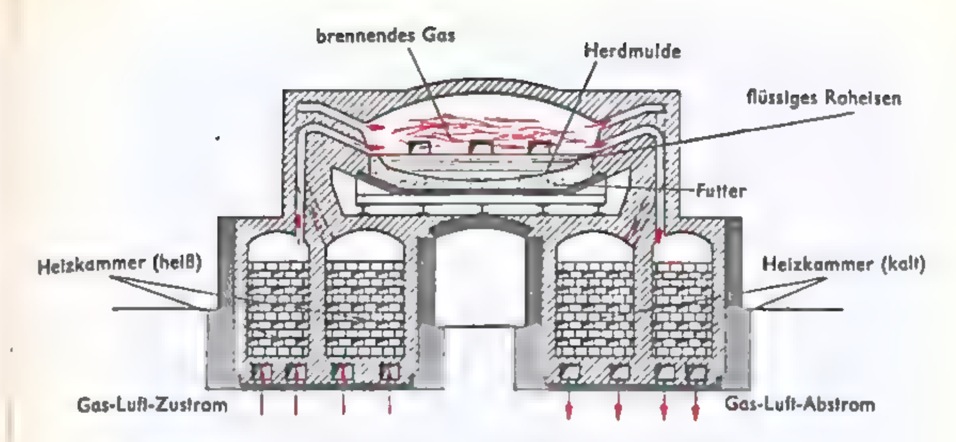


Abb. 1a Siemens-Martin-Ofen

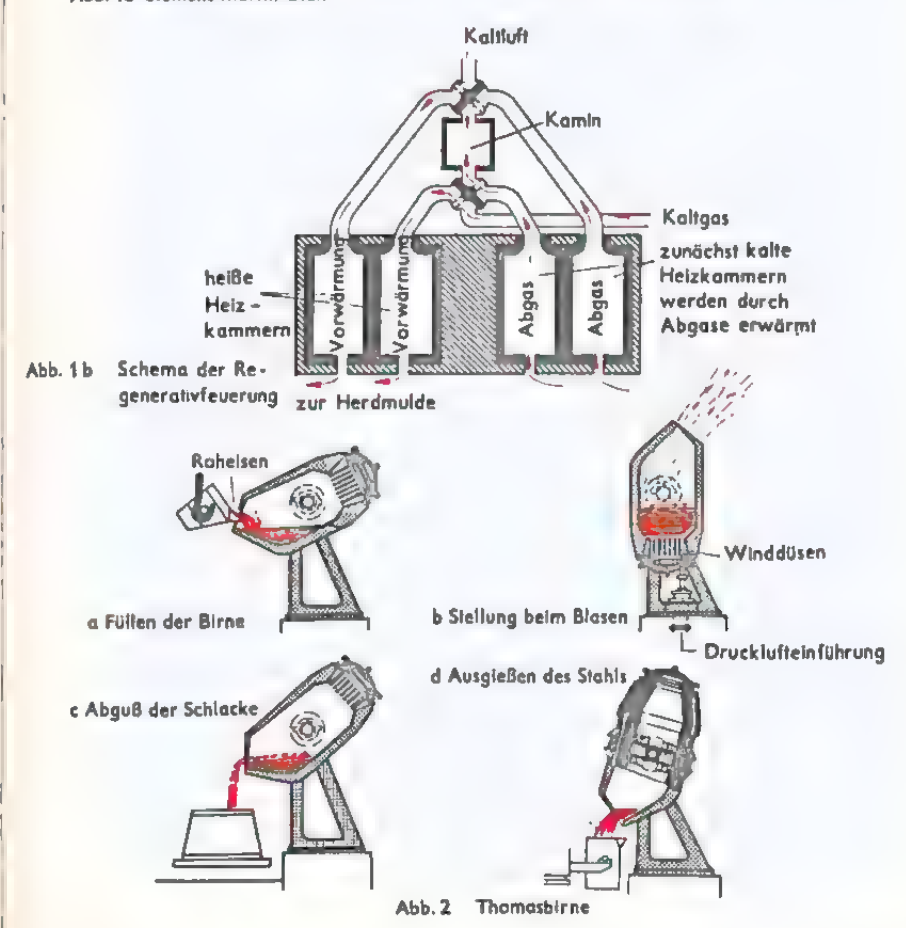


Abb. 1b Schema der Regenerativfeuerung

Abb. 2 Thomasbirne

STAHLHERSTELLUNG II

Der Abschluß nach unten wird durch einen mit zahlreichen Kanälen versehenen Boden gebildet. An zwei Seiten sind Zapfen angeordnet, in denen die Birne drehbar gelagert ist. Zum Füllen wird die Birne gekippt und aus einem Pfanne genannten Gefäß mit flüssigem Roheisen gefüllt (Abb. 2a, S. 127). Ist die Füllung beendet, so wird die Birne in aufrechte Stellung gebracht, gleichzeitig wird von unten durch die Kanäle im Boden Preßluft (sog. Wind) durch die flüssige Schmelze geblasen (Abb. 2b, S. 127).
Dieses Einströmen der Preßluft nennt man Blasen, das gesamte Verfahren im Gegensatz zur Herstellung von Siemens-Martin-Stahl ein *Windfrischverfahren*. Der in der Luft enthaltene Sauerstoff verbrennt den Kohlenstoff und die anderen Beimengungen. Der der Schmelze beigemischte Kalk fördert die Abscheidung der gebildeten Oxide, d. h. das Absetzen der Schlacke auf der Oberfläche der Schmelze. Durch das Einblasen von Luft würde die Schmelze langsam abkühlen und schließlich erstarren, wenn nicht durch die Verbrennung des Phosphors im Roheisen zusätzlich Wärme entstünde, die die Temperatur der Schmelze sogar noch erhöht. In der Thomasbirne wird also vorwiegend phosphorreiches Roheisen verarbeitet.
Nach Beendigung des Frischens (der Zeitpunkt wird nach der Farbe der oben aus der Birne schlagenden Flammen bestimmt) wird die Birne wieder gekippt, zuerst die flüssige Schlacke abgeschüttet und anschließend der flüssige Stahl oder Flußstahl in Kokillen (Formen) gegossen (Abb. 2c und 2d, S. 127).
Ein ähnliches Verfahren stellt das Bessemerverfahren dar. Die dabei verwendeten Birnen sind jedoch kleiner, aufgrund des Futters (der Auskleidung im Innern) werden hier phosphor- und schwefelarme Roheisen, die in Deutschland selten sind, erschmolzen.

Herstellung von Oxygenstahl

Die Anwendung reinen Sauerstoffes zum Frischen bei der Stahlherstellung hat zur Entwicklung einer Reihe von Verfahren geführt. Allen gemeinsam ist, daß mit ein oder zwei wassergekühlten Lanzen reiner Sauerstoff auf oder in das flüssige Roheisen geblasen wird. Als Schmelzgefäß wird dabei ein basisch ausgekleideter kippbarer Konverter benutzt, der sich vom Thomaskonverter nur dadurch unterscheidet, daß er einen geschlossenen Boden besitzt (LD-Verfahren, Abb. 4a) oder ein längliches Drehgefäß, das mit geringerer (Rotor-Verfahren, Abb. 4b) oder höherer Drehgeschwindigkeit (Kaldo-Verfahren, Abb. 4c) rotiert. Soll phosphorhaltiges Roheisen (Thomasroheisen) verarbeitet werden, muß zur Verschlackung des Phosphors dem Sauerstoffstrom Staubkalk zugegeben werden (LDAC- und OLP-Verfahren). Ein besonderes Problem bei diesen Oxygenstahlverfahren ist die Beseitigung des beim Blasen auftretenden braunen Rauches durch Abgasfilter. Die Güte der Stähle, die nach diesen Verfahren erzeugt werden, entspricht der des Siemens-Martin-Stahls. Die Stähle zeichnen sich vor diesem sogar noch durch geringere Gehalte an Spurenelementen (wie z. B. Kupfer) aus.

Herstellung von Elektrostahl

Ein weiteres Verfahren, bei dem man Flußstahl von besonders großer Reinheit erschmelzen kann, ist das Elektrostahlverfahren; die Benennung ergibt sich aus der Tatsache, daß die Wärme hier nicht durch Gas oder Kohle, sondern durch elektrischen Strom erzeugt wird. Rohmaterial ist flüssiger Siemens-Martin-Stahl, der bei dieser Nachbehandlung gereinigt wird, also eine besondere Qualität erhält. Als Kaltbeschickung kann jedoch auch Stahlschrott mit Roheisenzusatz verwendet werden. Die Wärmeentwicklung erreicht man dabei meistens durch den elektrischen Lichtbogen, der sich zwischen mehreren in den Ofen hineinragenden Kohleelektroden und der Schmelze spannt. Dem Elektroofen (Abb. 3) wird keine Verbrennungsluft zur Oxydation der unerwünschten Beimengung zugeführt. Man setzt vielmehr Eisenoxide zu, die ihren Sauerstoff abgeben.

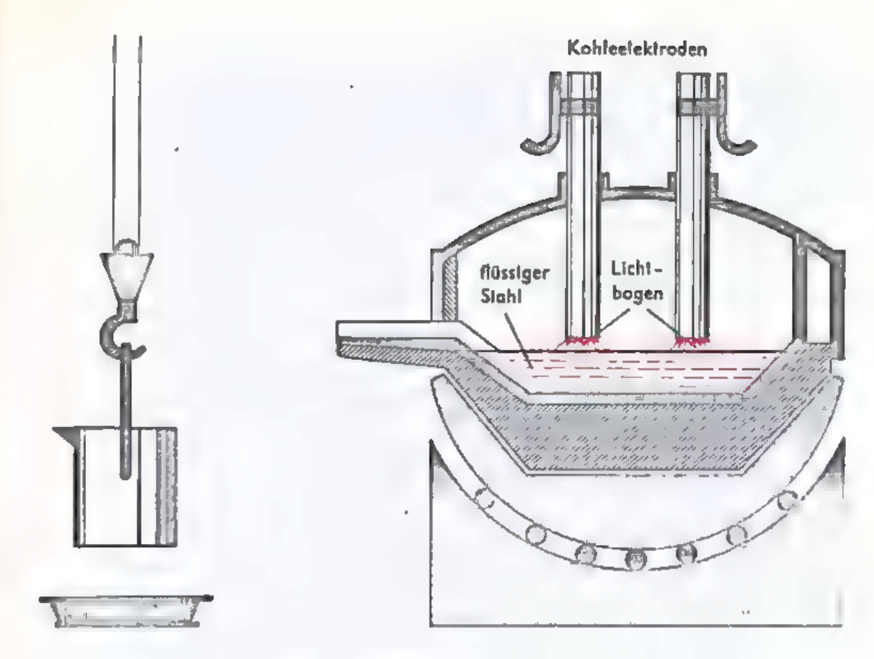
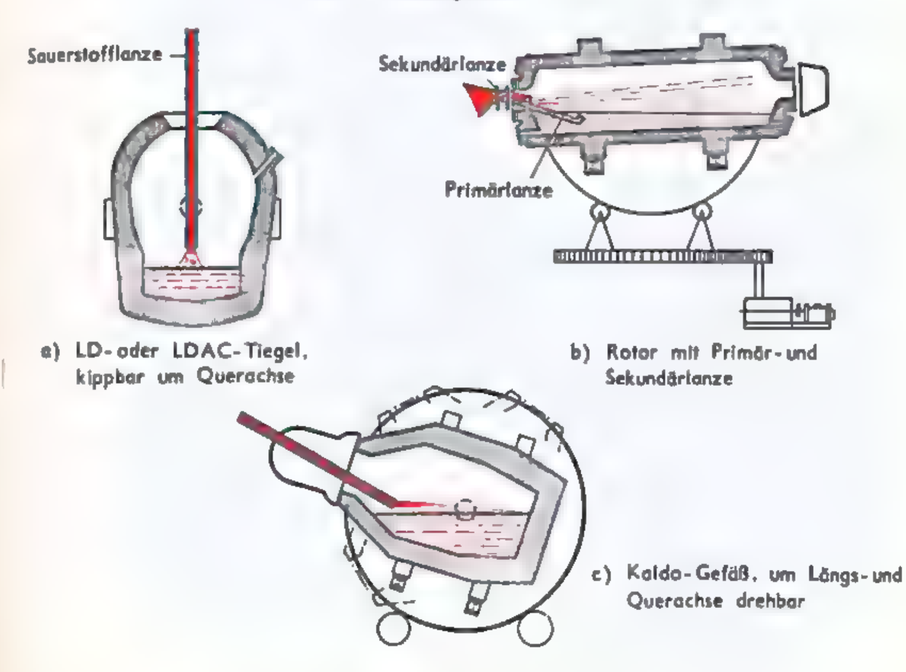


Abb. 3 Lichtbogenofen



a) LD- oder LDAC-Tiegel, kippbar um Querachse

b) Rotor mit Primär- und Sekundärlanze

c) Kaldo-Gefäß, um Längs- und Querachse drehbar

Abb. 4 Verschiedene Sauerstoff-Blasverfahren

RÖSTEN VON ERZEN

Die Erze bzw. Konzentrate der schweren Nutzmetalle Kupfer, Blei, Zink und Nickel (nicht aber von Eisen und Zinn) sind vorwiegend sulfidischer Natur. Um die Konzentrate mit Kohlenstoff reduzieren oder mit verdünnten Säuren in Lösung bringen zu können, muß der Schwefel ganz oder teilweise entfernt werden. Dies geschieht durch Rösten, eine Wärmebehandlung in oxydierender Atmosphäre, die allgemein nach der Formel $MeS + \frac{3}{2} O_2 = MeO + SO_2$ abläuft (wobei für Me ein beliebiges zweiwertiges Metall eingesetzt werden kann). Die Röstung führt zu Metalloxid und Schwefeldioxidgas, das üblicherweise zu Schwefelsäure verarbeitet wird. Wenn der Röstvorgang durch Zünden einmal eingeleitet ist, läuft er unter Wärmeentwicklung ohne weitere Brennstoffzufuhr ab. Arsen und Antimon werden, falls vorhanden, beim Rösten ebenfalls beseitigt. Im weiteren Sinne versteht man unter Rösten auch die Abspaltung von Kohlensäure aus karbonatischen Erzen. Der Röstprozeß wird je nach der Weiterverarbeitung des Röstgutes so geführt, daß danach das gesamte Metall als Oxid vorliegt (totrösten), oder daß nur ein Teil des Metalls in die Oxidform übergeführt wird, während der Rest an Schwefel gebunden bleibt (partielles Rösten). Schließlich kann der Röstvorgang durch Veränderung der zugeführten Luftmenge und der Temperatur auch so beeinflußt werden, daß weitgehend das Sulfat des betreffenden Metalls oder durch Zugabe von Chloridsalzen oder Chlorgas das Chlorid gebildet wird (sulfatisierendes bzw. chlorierendes Rösten).

Die in Anwendung stehenden Röstverfahren sind mannigfaltig. Der Mehretagen-Röstofen (Typ Herreshoff-Wegde; Abb. 1) hat mehrere tellerförmige Herde übereinander mit darüber laufenden an einer zentralen Welle befestigten Krählarmen. Das abzuröstende feine Gut wird am äußeren Rand des obersten Tellers aufgegeben, von den Krählern zur Mitte geschoben, fällt dort auf den nächsttieferen Herd, wo es von den in umgekehrter Richtung arbeitenden Krählern wieder nach außen befördert wird und so fort. Dabei röstet der Schwefel ab.

Beim Schweberösten erfolgt das Abrösten von feingemahlenem schwefelreichen Konzentrat während des Herabfallens in einer hocherhitzten Verbrennungskammer. Das Konzentrat wird zusammen mit der vorgewärmten Verbrennungsluft oben in den Ofenschacht eingeblasen. Dieser Prozeß wird auch als Blitzröstung (flash-roasting; Abb. 2) bezeichnet, weil sich die Abröstung in wenigen Sekunden vollzieht. Bei der Wirbelschichtröstung (Fluosolidröstung; Abb. 3) wird das abzuröstende Gut durch Luft, die mit einer bestimmten Geschwindigkeit von unten durch einen Rost geblasen wird, in einem turbulenten Schwebezustand gehalten. Das dicht über dem Wirbelbett kontinuierlich eingetragene Gut wird sehr rasch gleichmäßig verteilt und abgeröstet. Ein Teil des fertigen Materials verläßt die Kammer durch einen Überlauf, ein anderer Teil als Flugstaub mit den Abgasen. Das Verfahren ist besonders leistungsfähig und wird in zunehmendem Maße angewendet.

Im Drehrohrofen (Abb. 4), einem schwach geneigt liegenden, feuerfest ausgekleideten Rohr mit äußerem Drehantrieb, wird das zu röstende Material durch die Drehbewegung des Ofens von dessen oberem zum unteren Ende befördert und dabei abgeröstet. Bei den genannten Röstverfahren fällt das abgeröstete Gut in Pulverform an, wie es für die Verarbeitung im Flammofen oder durch Laugung erforderlich ist. Zum Einsatz im Schachtofen benötigt man jedoch stückiges Material. Auf dem Sinterband (Abb. 5; nach Dwight-Lloyd) oder der runden Sintermaschine (von Schlippenbach) findet neben dem Rösten ein Zusammenbacken (Sintern) der oberflächlich geschmolzenen Teilchen statt, so daß ein fester poröser Sinter entsteht. Durch die auf einem Wanderrost befindliche Erz- bzw. Konzentratschicht wird Röstluft von oben nach unten hindurchgesaugt (Saugzugsinterung) oder von unten nach oben hindurchgepreßt (Drucksinterung). Nach der Aufgabe wird das Gut zur Einleitung des Röstprozesses unter einer Haube durch eine Gas-, Öl- oder Kohlenstaubflamme gezündet.

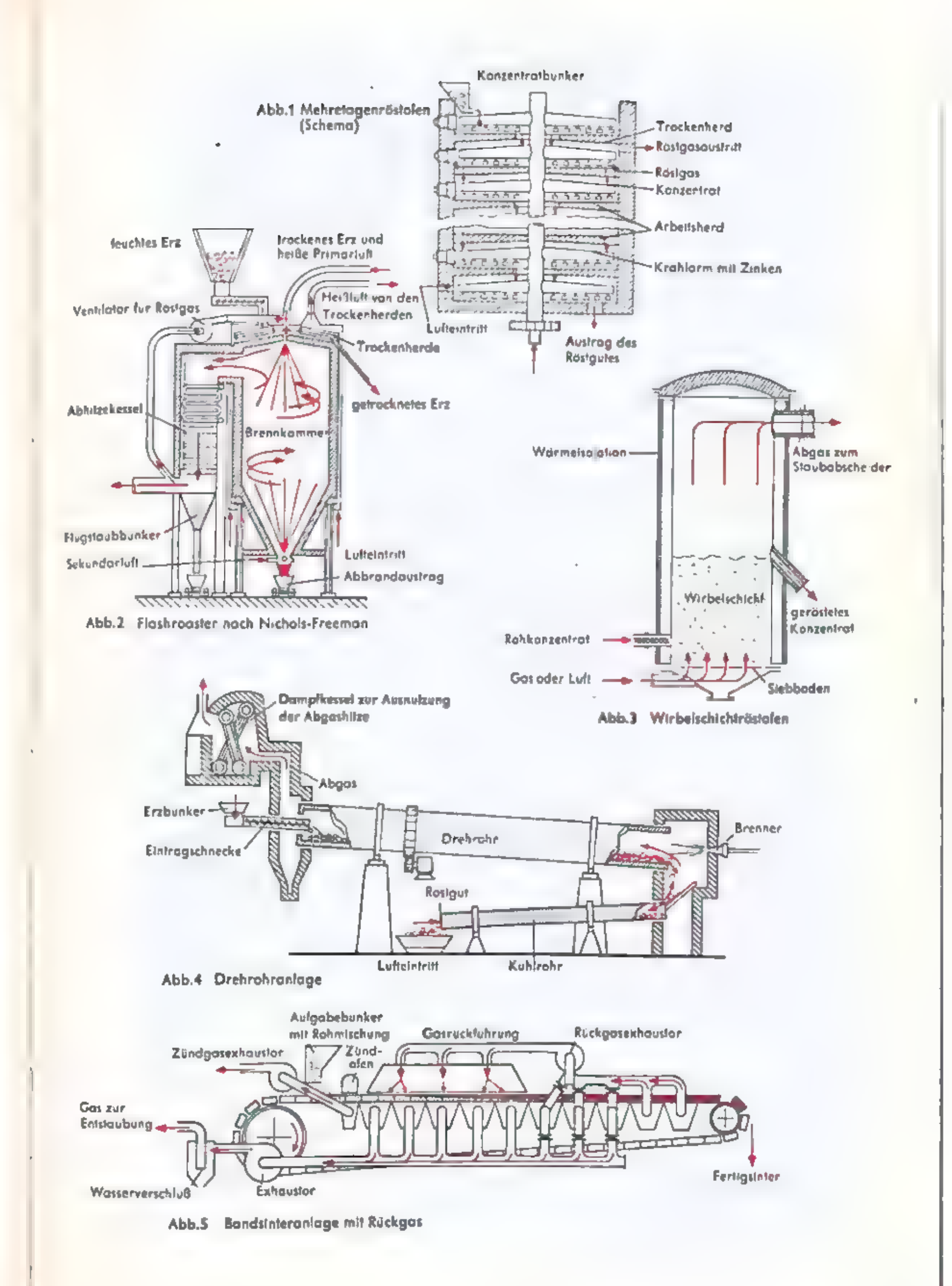


Abb. 1 Mehretagenröstofen (Schema)

Abb. 2 Flashroaster nach Nichols-Freeman

Abb. 3 Wirbelschichtröstofen

Abb. 4 Drehrohranlage

Abb. 5 Bandsinteranlage mit Rückgas

BLEIGEWINNUNG

Blei liegt in den meisten Bleierzen an Schwefel gebunden als silberhaltiger Bleiglanz (PbS) vor. Die Erze enthalten gewöhnlich nur wenige Prozente Blei und sind mit Zinkblende, Kupfer- und Schwefelkies und anderen Mineralien vergesellschaftet. Deshalb werden sie zunächst durch Flotation (s. S. 120) angereichert, wobei eine weitgehende Trennung von Bleiglanz und Zinkblende erreicht wird. Das dabei erhaltene Bleikonzentrat kann bis zu 80 % Pb enthalten. Die Verarbeitung erfolgt überwiegend durch Rösten und anschließende Reduktion im Schachtofen (Abb. 1). Um die Bildung von Bleikupferstein, einem Gemisch von Schwefelverbindungen des Bleis, Kupfers und Eisens, im Schachtofen gering zu halten, muß das Konzentrat bis unter 1 % S abgeröstet oder totgeröstet werden. Dies erreicht man durch einen zweistufigen Röstprozeß oder durch eine einstufige Sinterröstung unter teilweiser Rückführung des bereits vorgerösteten Gutes. Der Röstprozeß muß mit einer Sinterung verbunden sein, weil im Schachtofen zur Erhaltung der Luftdurchlässigkeit nur stückiges Material aufgegeben werden kann. Das gesinterte und entschwefelte Konzentrat, in dem das Blei nun als Bleioxid (PbO) vorliegt, wird im Schachtofen (Abb. 2), der einen runden oder rechteckigen Querschnitt haben kann, mit Koks als Reduktionsmittel und Brennstoff verschmolzen.

Unreines Blei (Werkblei) und Schlacke sammeln sich im unteren Teil des Ofens an; die spezifisch leichte Schlacke fließt kontinuierlich in einen Vorherd, wo sich möglicherweise gebildeter Stein und mitgerissenes Werkblei absetzen. Das spezifisch schwere Blei wird vom Ofenboden über einen Siphon fortlaufend in einen Kessel abgezogen. Da das Werkblei noch eine Reihe von Verunreinigungen wie Kupfer, Antimon, Arsen, Zinn, Wismut und Edelmetalle, vor allem Silber, enthält, muß es zur Herstellung von technisch reinem Blei (Original-Hütten-Weichblei) raffiniert werden. Das im Werkblei enthaltene Kupfer scheidet sich bereits weitgehend bei der Abkühlung des Bleis im Kessel zusammen mit anderen Verunreinigungen, so Schwefel, Arsen und etwas Bleioxid, als Kupferschlicker ab. Durch Einrühren von Schwefel kann das restliche Kupfer entfernt werden. Die Beseitigung von Antimon, Zinn und Arsen erfolgt durch selektive Oxydation dieser Verunreinigungen in einem Flammofen oder nach dem Harrisverfahren. Hierbei werden mit Hilfe einer speziellen Apparatur Ätznatron, Kochsalz und Salpeter mit der Bleischmelze in Berührung gebracht, wobei sich salzartige Verbindungen von Antimon, Zinn und Arsen bilden, die getrennt aufgearbeitet werden. Zur Entsilberung des vorraffinierten Werkbleis bedient man sich des Parkesverfahrens. In das im Kessel befindliche geschmolzene Blei wird bei etwa 450 °C metallisches Zink eingerührt. Dieses löst sich im Blei, und beim Abkühlen des Bades scheiden sich infolge abnehmender Löslichkeit Zink-Silber-Mischkristalle aus, die sich als spezifisch leichter Schaum auf dem Bleibad absetzen und abgehoben werden. Das Blei wird nun durch Abdestillieren des Zinks im Vakuum oder andere Maßnahmen fertig raffiniert. Aus dem silberhaltigen Schaum wird durch Abdestillieren des Zinks und Oxydieren des Bleis im Treibeprozeß das Silber gewonnen (Abb. 3).

Wenn das raffinierte Blei das bei der Weiterverarbeitung störende Element Wismut enthält, muß dieses entweder durch Bildung einer intermetallischen Verbindung oder durch Elektrolyse entfernt werden. Beim Kroll-Betterton-Verfahren erzeugt man durch Zugabe von Calcium und Magnesium eine spezifisch leichte Bi-Ca-Mg-Legierung, die als Schaum abgezogen werden kann. Beim Jollivet-Pennaroya-Prozeß besteht diese Legierung aus Wismut, Kalium und Magnesium. Die elektrolytische Raffination in kieselfluorwasserstoffsaurer Lösung ist nur bei Wismutgehalten über 0,5 % wirtschaftlich. Sie erbringt neben Elektrolytblei einen Anodenschlamm, der nach Vorbehandlung auf Elektrolytwismut verarbeitet werden kann.

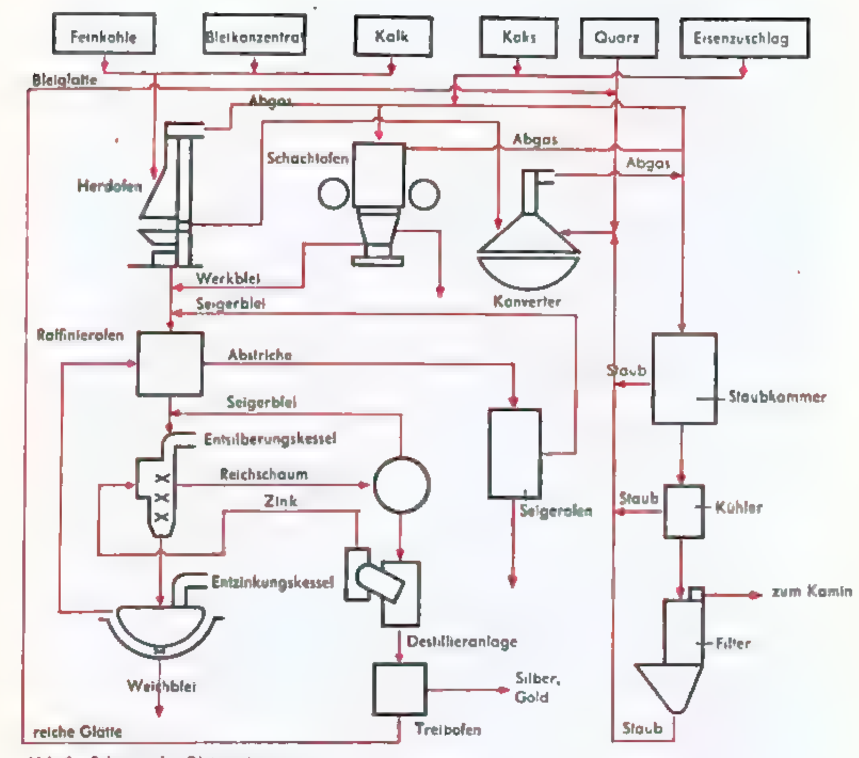


Abb. 1 Schema der Bleigewinnung

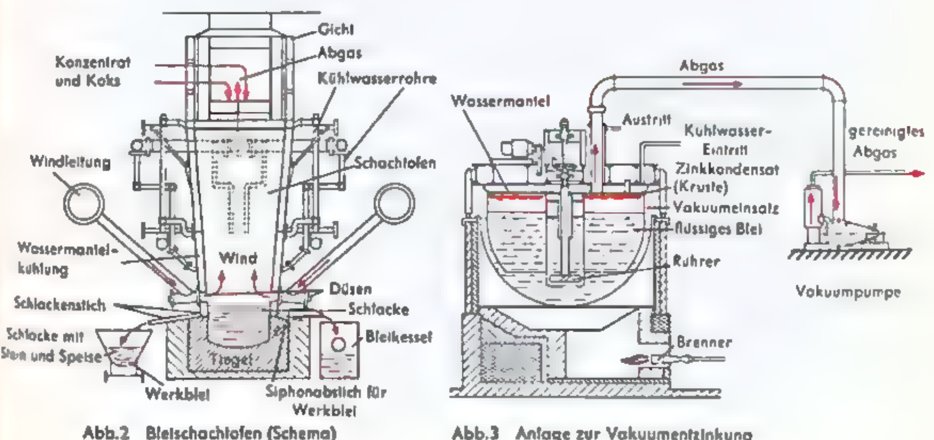


Abb. 2 Bleischachtofen (Schema)

Abb. 3 Anlage zur Vakuumentzinkung

KUPFERGEWINNUNG

Kupfer (Cu) wird überwiegend aus sulfidischen Erzen gewonnen, die nur 1 bis 2%, häufig auch nur 0,7% Cu enthalten. Durch Flotation (s. S. 120) lassen sich daraus Konzentrate mit 15 bis 35% Cu herstellen. Aus wirtschaftlichen und technischen Gründen wird hieraus nicht direkt Rohkupfer durch Totrösten und Reduktion mittels Kohlenstoff gewonnen, vielmehr reichert man das Kupfer zunächst in einem sulfidischen Zwischenprodukt, dem sogenannten Kupferstein, weiter an. Dieses im wesentlichen aus Kupfer (35 bis 50%), Eisen und Schwefel bestehende Zwischenprodukt erschmilzt man in großen Flammöfen, weil diese für die Verarbeitung feiner Konzentrate besonders geeignet sind. Die Konzentrate werden vorher in Mehretagenöfen nur soweit abgeröstet, daß beim Steinschmelzen das gesamte Kupfer und ein Teil des Eisens an Schwefel gebunden werden können (Abb. 1). In manchen Fällen können die Konzentrate ohne Vorröstung in den Flammofen gegeben werden, weil während des Einschmelzens genügend Schwefel verbrennt. Im naturgas-, öl- oder kohlenstaubbeheizten Flammofen (Abb. 2) entsteht neben dem spezifisch schweren Kupferstein, der sich am Herdboden absetzt und von dort periodisch abgestochen wird, eine spezifisch leichte Schlacke, vorwiegend aus Kieselsäure und den Oxiden des Eisens, Kalziums, Magnesiums und Aluminiums bestehend, die oberhalb des Kupfersteins durch den Schlackenstich abfließt. Der schmelzflüssige Kupferstein wird in einen Konverter gefüllt, in den zur Entfernung des Eisens und Schwefels durch seitlich angebrachte Düsen Preßluft eingeblasen wird (Abb. 3). Zunächst wird das Eisen oxydiert und bildet mit silikatischen Zuschlägen eine Schlacke, die abgegossen wird. Durch weiteres Verblasen verbrennt ein Teil des an Kupfer gebundenen Schwefels, so daß Kupferoxid und Kupfersulfid nebeneinander vorliegen. Durch die Röstreaktion $2\,Cu_2O + Cu_2S = 6\,Cu + SO_2$ bilden sich metallisches Kupfer und Schwefeldioxid. Die schwefeldioxidreichen Abgase der Konverterarbeit werden in der Konverterhaube aufgefangen und der Schwefelsäurefabrik zugeführt. Das im Konverter erblasene Rohkupfer, wegen seiner Farbe auch als Schwarzkupfer bezeichnet, wird in kleineren Flammöfen raffiniert, um metallische Verunreinigungen sowie Sauerstoff und restlichen Schwefel zu beseitigen. Durch Einblasen von Luft in die Schmelze werden die Verunreinigungen, die unedler als das Kupfer sind, verflüchtigt oder verschlackt. Nach Abziehen der Schlacke führt man in die Schmelze frische Holzstämme ein. Sie sorgen für eine Durchwirbelung und Entgasung der Schmelze, so daß das Kupfer zäh, dicht und schmiedbar wird. Der Gehalt des Kupfers an Nickel und Edelmetallen erfordert gewöhnlich noch eine weitere Raffination durch Elektrolyse (Abb. 4). Gegossenen Anoden aus dem vorraffinierten Kupfer hängen im schwefelsauren Elektrolyten dünne Bleche aus reinem Kupfer als Kathoden gegenüber, an denen sich unter Einwirkung des elektrischen Stromes reines Elektrolytkupfer mit 99,97% Cu abscheidet. Aus einem Teil des Elektrolyten, der zur Reinigung abgezweigt wird, gewinnt man Nickelsulfat. Im Anodenschlamm sammeln sich die Edelmetalle an und werden durch spezielle Verfahren aufbereitet. Das Elektrolytkupfer wird für Legierungszwecke (Messing, Bronze u. a.) in Form zerschnittener Kathoden verkauft, meistens aber eingeschmolzen und zu Walzplatten und anderen Formaten vergossen.

Aus geeigneten armen Erzen kann das Kupfer auch auf nassem Wege durch Laugen und Fällen abgetrennt werden. Oxidische Erze kann man unmittelbar laugen, sulfidischen Erzen muß eine sulfatisierende oder chlorierende Röstung vorausgehen, um das Kupfer in eine laugbare Verbindung zu bringen. Aus der Lösung wird das Kupfer entweder durch Eisen als Zementkupfer ausgefällt oder elektrolytisch abgeschieden. Das Zementkupfer bedarf der üblichen Raffination. Bestimmte, insbesondere komplexe Kupfer-, Nickel-, Kobalterze, werden neuerdings durch Laugung und Fällung unter Druck im Autoklaven aufgeschlossen.

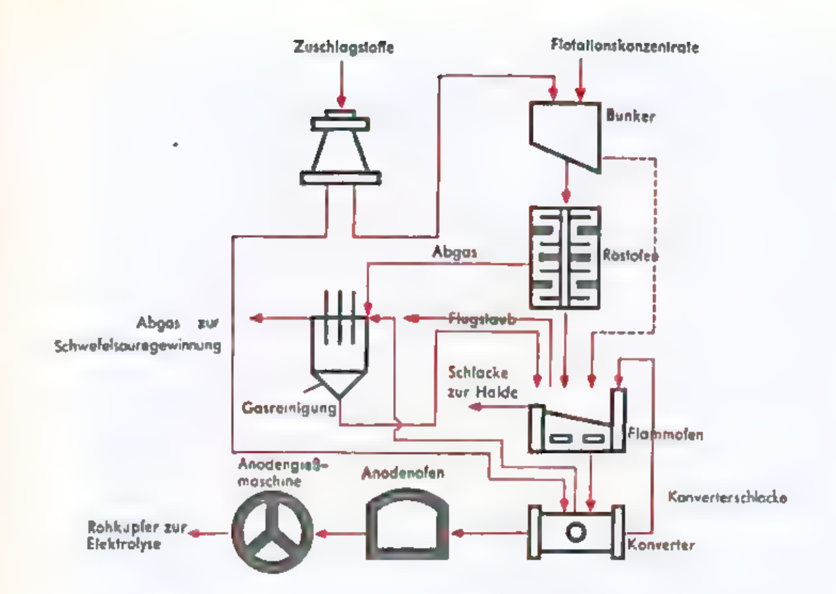


Abb. 1 Stammbaum der Kupfergewinnung (Rohkupfer)

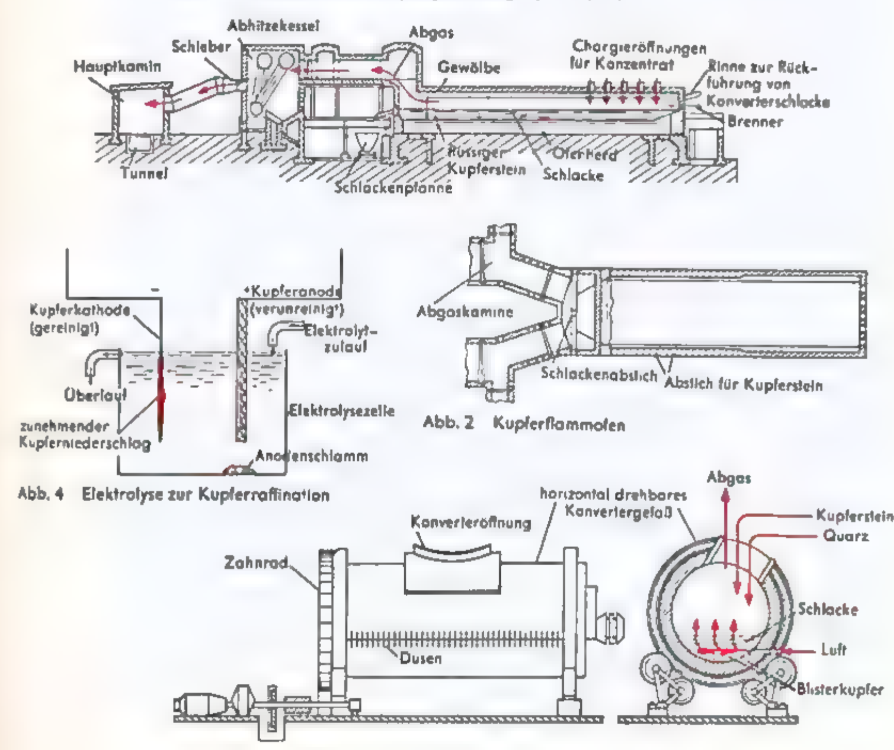


Abb. 2 Kupferflammofen

Abb. 4 Elektrolyse zur Kupferraffination

Abb. 3 Schema eines Kupferkonverters

ZINKGEWINNUNG

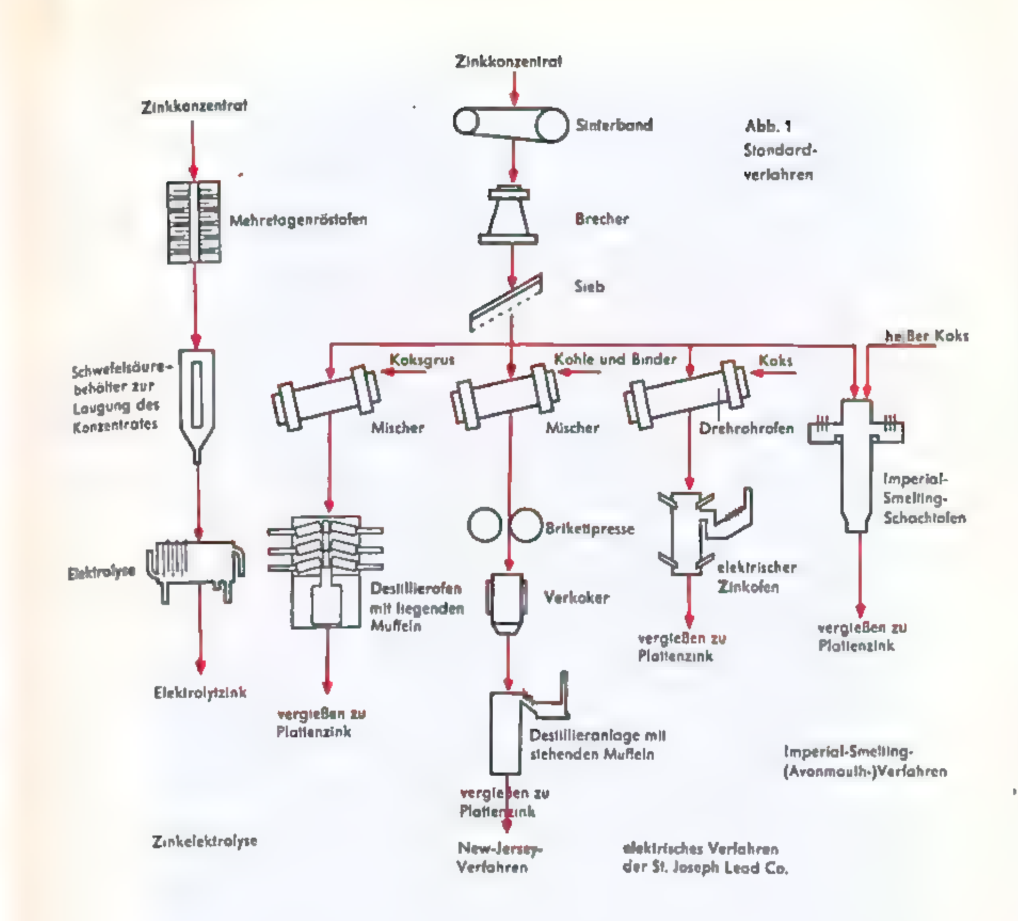
Das für die Zinkgewinnung wichtigste Erz ist die Zinkblende (ZnS). Sie ist gewöhnlich mit Bleiglanz (PbS) und in kleineren Mengen mit den Sulfiden anderer Metalle vergesellschaftet. Durch selektive Flotation gewinnt man Konzentrate mit über 50% Zn. Das Zink kann daraus durch verschiedene thermische Reduktionsverfahren oder durch Laugung und Elektrolyse gewonnen werden. In jedem Falle muß eine vollständige Röstung vorangehen, um das Zinksulfid zu Zinkoxid umzuwandeln und es dadurch laugbar bzw. mit Kohlenstoff reduzierbar zu machen. Aus armen, nicht aufbereitbaren Zinkerzen und aus zinkreichen Zwischenprodukten, z. B. Flugstäuben von der Blei- und Kupferverhüttung, gewinnt man für die Zinkerzeugung geeignetes Zinkoxid nach dem sog. Wälzverfahren. Hierbei wird das zinkhaltige Material in einem langen Drehrohrofen reduzierend erhitzt, so daß das Zink als Dampf verflüchtigt. Es verbrennt im oberen Teil des Ofens zu Zinkoxid, das mit den Abgasen den Ofen verläßt und in Sackfilteranlagen aufgefangen wird. Die Zinkgewinnung auf trockenem Wege bereitet besondere Schwierigkeiten, weil das Zink einen niedrigen Siedepunkt (906 °C) hat und bei der für die Reduktion erforderlichen Temperatur (1300 °C) in der Gasphase vorliegt. Deshalb muß die Reduktion in luftdicht verschlossenen Gefäßen bzw. Öfen vorgenommen und der Zinkdampf ohne Luftzutritt kondensiert werden. Für die thermische Reduktion werden die Konzentrate entweder zweistufig, zunächst in einem Mehretagenofen und danach auf dem Sinterband, oder einstufig unter Rückführung eines Teils des bereits abgerösteten Gutes auf der Sintermaschine geröstet. Der Sinterprozeß ist erforderlich, weil für alle thermischen Reduktionsverfahren ein gut luftdurchlässiges Material benötigt wird. Nach dem Standardverfahren wird die Reduktion des Zinkoxids in liegenden Muffeln vorgenommen (Abb. 1).

Ein Muffel- oder Destillierofen (Abb. 2) besteht aus einem Unterofen mit Regenerationskammern zur Vorwärmung von Gas und Verbrennungsluft und einem Oberofen, in dem die Muffeln in drei Reihen so übereinander angeordnet sind, daß sie von den heißen Flammengasen aufgeheizt werden können (Abb. 3). Muffeln sind rechteckige Destilliergefäße aus Ton und Schamotte, mit einem Querschnitt von z. B. 20 × 30 cm und einer Länge von 2 m und werden in der Regel auf der Zinkhütte selbst hergestellt. Sie haben nur eine kurze Lebensdauer und müssen alle 4 bis 6 Wochen ausgewechselt werden. Die aus dem Ofen herausragenden Muffelmündungen sind mit ebenfalls aus feuerfestem Material hergestellten Vorlagen verbunden, auf die zylindrische Blechröhrenallongen gesteckt werden.

Die Beschickung aus zerkleinertem Sintergut, zinkhaltigen Zwischenprodukten und Koksklein als Reduktionsmittel wird mit schnellaufenden Förderbändern in die Muffeln geschleudert. Nach dem Füllen werden die Vorlagen aufgesetzt, mit Lehm luftdicht verschmiert und mit den Allongen versehen. Dann wird der Ofen aufgeheizt, so daß bei etwa 1300 °C die Reduktion des Zinkoxids nach $ZnO + C \rightarrow Zn + CO$ abläuft.

Der entstehende Zinkdampf entweicht aus den Muffeln in die Vorlagen, wo er zum größten Teil als flüssiges Metall kondensiert. Der Rest des Zinks wird vorwiegend als Zinkstaub in den Allongen niedergeschlagen. Nach etwa 20 Stunden ist der Prozeß beendet. Das flüssige Zink und der Zinkstaub werden aus Vorlagen und Allongen entfernt und die ausgebrannten Rückstände durch Räummaschinen aus den Muffeln ausgekratzt. Räumen und Beschicken der Muffeln werden als Manöver bezeichnet, das etwa 4 Stunden dauert, so daß der ganze Zinkgewinnungszyklus in den liegenden Muffeln während 24 Stunden abläuft.

Nach einer neueren Erfindung entfallen die Vorlagen für die einzelnen Muffeln, an ihre Stelle tritt ein gemeinsamer großer Kondensationsraum.



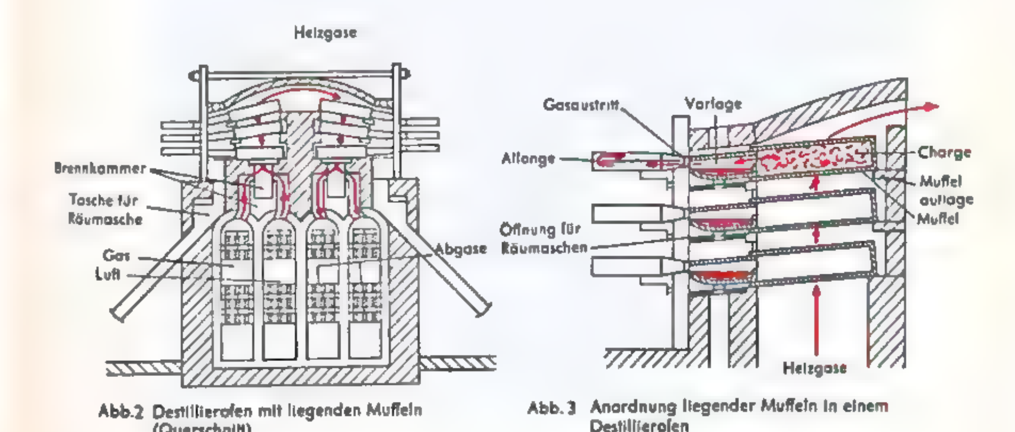


Abb. 2 Destillierofen mit liegenden Muffeln (Querschnitt)

Abb. 3 Anordnung liegender Muffeln in einem Destillierofen

ALUMINIUMHERSTELLUNG

Aluminiumoxid ist in Ton, Kaolin und anderen Gesteinen so weit verbreitet, daß der Rohstoff zur Aluminiumerzeugung praktisch unerschöpflich ist. Aus vorwiegend wirtschaftlichen Gründen geht man bisher fast ausschließlich von Bauxit aus, einem Verwitterungsgestein, das neben 55 bis 65% Aluminiumoxid, Eisenoxid, Kieselsäure und Titanoxid in wechselnden Beimengungen enthält. Die Aufarbeitung des Bauxits erfolgt zweistufig, wobei man zunächst reines Aluminiumoxid (Al_2O_3) herstellt, das dann durch Schmelzflußelektrolyse in Aluminium und Sauerstoff zerlegt wird.

Die wichtigste Art zur Herstellung von Aluminiumoxid ist das Bayerverfahren (Abb. 1). Der Bauxit wird getrocknet, feingemahlen und im Autoklaven mit Natronlauge aufgeschlossen. Dabei geht das Aluminium als Natriumaluminat ($NaAlO_2$) in Lösung, während Eisenoxid, Titanoxid und Kieselsäure ungelöst im sogenannten Rotschlamm verbleiben. Nach dem Filtrieren wird durch Impfen mit Aluminiumhydroxid und Ausrühren das Aluminium als Aluminiumhydroxid ($Al(OH)_3$) gefällt. Es wird abfiltriert und durch Glühen in Drehöfen zu Aluminiumoxid, auch Tonerde genannt, calciniert. Die Herstellung dieses reinen Oxids ist erforderlich, weil andernfalls Eisen, Titan und Silicium bei der anschließenden Schmelzflußelektrolyse im Aluminiummetall enthalten wären.

Die Zerlegung des Aluminiumoxids erfolgt in Schmelzflußelektrolyseöfen (Abb. 2). Sie bestehen aus mit Kohlenstoffsteinen ausgekleideten Wannen, in die von oben Anoden hineinragen. Der Kohleboden bildet die Kathode. Als Anoden werden zwei Typen von Kohleelektroden verwendet: vorgebrannte Anoden aus reinsten Ausgangsstoffen wie Pechkoks, Petrolkoks oder Reinstkoks, oder selbstbackende Elektroden (Söderberganoden), bei denen die Kohlemasse in einen Aluminiummantel eingefüllt wird und während des Nachrutschens durch die Ofenhitze und den Stromdurchgang zu fester Anodenmasse zusammengebacken wird. Als schmelzflüssiger Elektrolyt befindet sich in der Zelle Kryolith, ein Natrium-Aluminium-Fluorid (Na_3AlF_6). In diese Schmelze wird Aluminiumoxid in regelmäßigen Abständen aufgegeben und unter Einwirkung des elektrischen Stromes in Aluminium und Sauerstoff zerlegt. Der Sauerstoff setzt sich mit der Anodenkohle zu CO und CO_2 um, die oben aus der Zelle entfernt werden. Auf dem Boden der Zelle sammelt sich das geschmolzene Aluminium und wird von Zeit zu Zeit abgestochen oder abgesaugt und vergossen. In regelmäßigen Abständen wird Aluminiumoxid nachgesetzt und so die Elektrolyse fortlaufend betrieben. Aus 4 t Bauxit erhält man rd. 2 t Aluminiumoxid und daraus 1 t Metall mit 99,5 bis 99,9% Al. Für die meisten Anwendungsgebiete genügt dieser Reinheitsgrad, in einzelnen Fällen ist jedoch eine Raffination notwendig.

Das heute wichtigste Raffinationsverfahren ist die Dreischichtenelektrolyse (Abb. 3). Die hierfür verwendete Zelle hat einen Kohleboden und Magnesitwände. Der Kohleboden ist im Gegensatz zur Schmelzflußelektrolyse als Anode geschaltet. Als Kathode ragt eine Graphitelektrode von oben in die Zelle. Das zu reinigende Aluminium wird zur Erhöhung seines spezifischen Gewichtes mit Kupfer oder auch anderen Metallen legiert und geschmolzen in die Zelle eingesetzt. Darüber befindet sich eine Salzschmelze, die spezifisch leichter ist als diese Legierung aber schwerer als reines Aluminium. Unter dem Einfluß des elektrischen Stromes geht nur das reine Aluminium von der Anode zur Kathode, d.h. es sammelt sich als oberste Schicht über der Salzschmelze an. Das 99,99% reine Metall wird von Zeit zu Zeit entfernt und zu handelsüblichen Formaten vergossen.

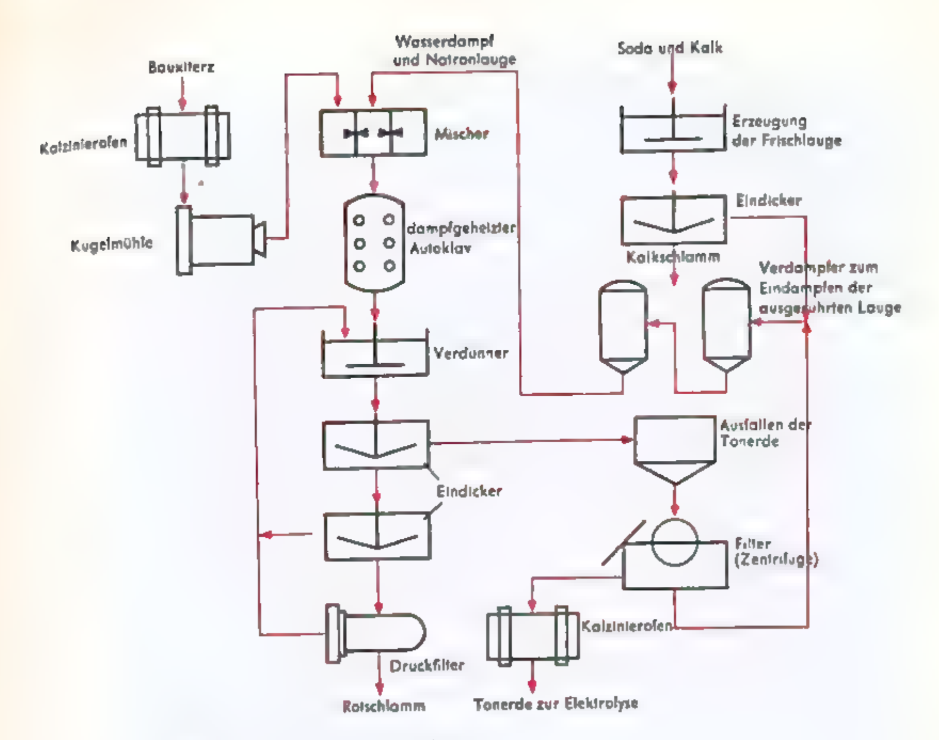


Abb. 1 Stammbaum des Bayerverfahrens

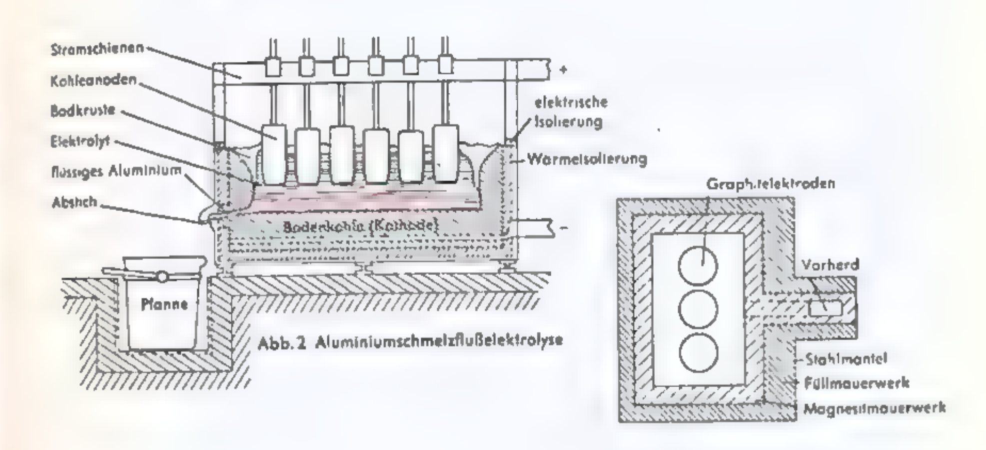


Abb. 2 Aluminiumschmelzflußelektrolyse

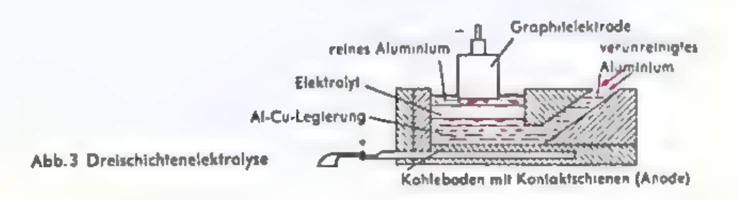


Abb. 3 Dreischichtenelektrolyse

HOLZ

Holz ist ein sehr inhomogenes, anisotropes Dauergewebe aus dem Achsenkörper der Holzpflanzen (Mark und Rinde bzw. Borke werden dem Holz nicht zugerechnet). Chemisch besteht das Holz in der Trockensubstanz aus etwa 40 bis 60 % Zellulose, etwa 20 % Hemizellulose (besonders bei Laubhölzern), 20 bis 30 % Lignin (besonders im Nadelholz) und 2,3 bis über 6,7 % Mineral- (Aschebestandteile) und Inhaltsstoffen (z. B. Eiweiße, Öle, Kohlehydrate, Harze, Gerb- und Farbstoffe). Die Holzasche inländischer Hölzer macht je nach Baumart, Holzteil und Wuchsort 0,15 bis 0,45 % aus. Sie enthält v. a. Kalium-, Calcium-, Phosphor-, Mangan-, Natrium-, Magnesium-, Eisen- und Schwefelverbindungen sowie Kieselsäure. Bei der Holzdestillation liefert z. B. lufttrockenes Buchenholz 26,7 % Kohle, 56,5 % Holzteer und Holzessig (einschließlich 43,6 % Wasser) und 16,8 % nicht kondensierbares Holzgas.

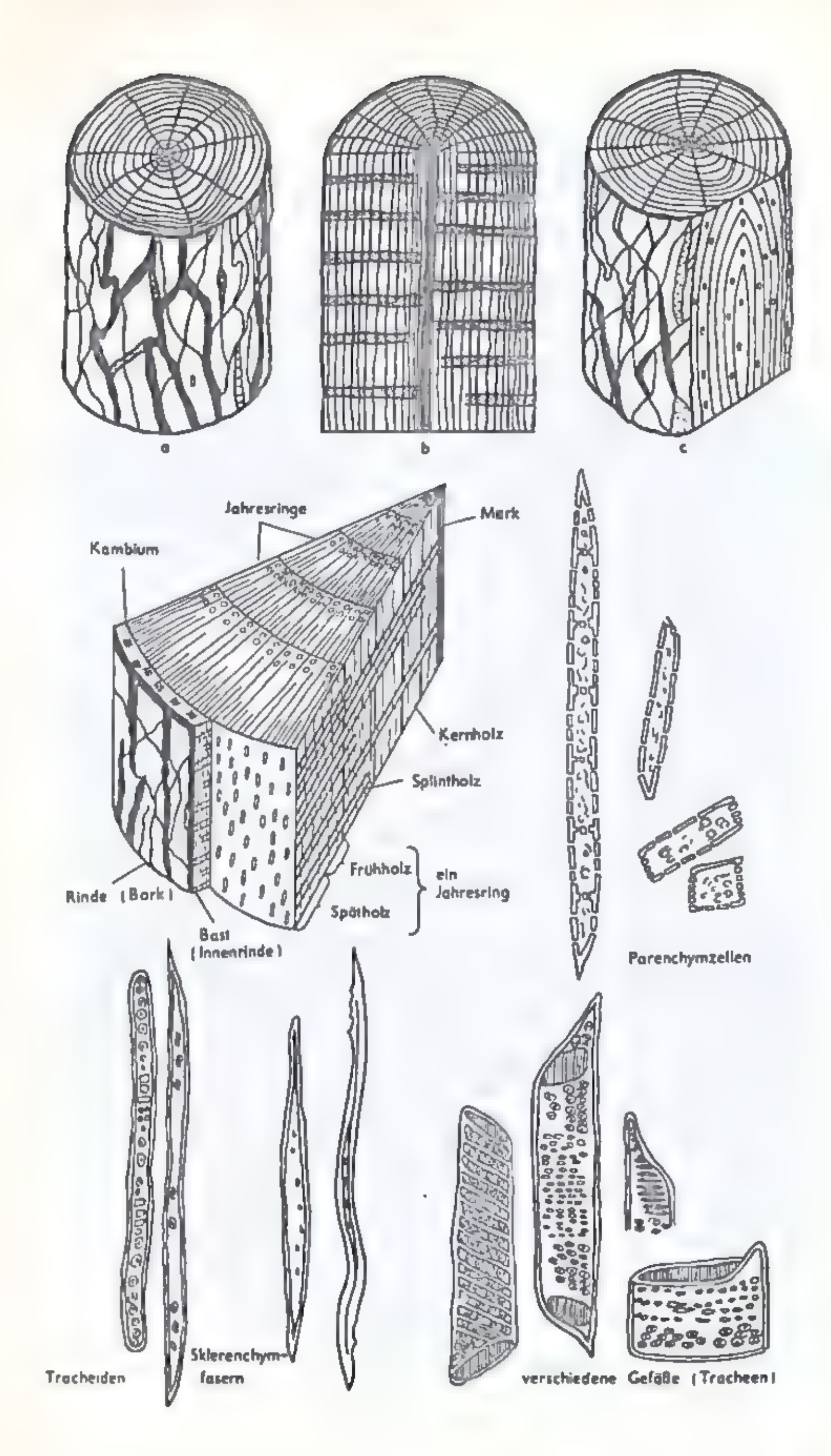
Aufbau des Holzes:

1. Makroskopischer Aufbau:

Bezogen auf die Stammachse sind drei Schnitte am Rundholz möglich (Abb. 1): a) Querschnitt (Hirnschnitt), b) Radialschnitt (Spiegelschnitt), c) Tangentialschnitt (Fladerschnitt). Ein Stammquerschnitt (Abb. 2) zeigt folgende Einzelheiten: im Zentrum das *Mark* (oft nur wenige mm Durchmesser), das von einem breiten Holzkörper umschlossen wird. Dieser setzt sich bei den meisten Holzarten aus *Jahresringen* zusammen (Tropenhölzer besitzen statt der Jahresringe andere Zuwachszonen). *Kernholzbäume* (z. B. Kiefer, Eiche, Lärche) haben im Innern des Stammquerschnitts einen Kern aus abgestorbenem, wasserarmem, sehr dichtem, dunklerem Holz (durch Einlagerung von Gerb- und Farbstoffen), das *Kernholz*. Eine nur geringe Verkernung ohne Verfärbung ergibt das ebenfalls tote *Reifholz* der *Reifholzbäume* (z. B. Fichte, Tanne, Rotbuche, Linde). Der äußere, oft hellere Holzteil mit noch lebenden Zellen wird als *Splint* bezeichnet. Im Splintteil erfolgt der Transport des von den Wurzeln aufgenommenen Wassers. Beim *Splint(holz)baum* besteht das Stamminnere ebenfalls aus Splintholz, d. h., es ist kein Kern ausgebildet (z. B. Birke, Erle). Das *Kambium* umschließt als dünner Mantel aus sehr teilungsaktiven Zellen den gesamten Holzkörper. Von ihm geht das Dickenwachstum des Stammes aus, indem es nach innen neues Holz bildet, nach außen den Bast. Im *Bast* erfolgt die Leitung der Assimilate von der Baumkrone abwärts bis zu den Wurzeln. Vom Bast mehr oder weniger weit in den Holzkörper hinein verlaufen zahlreiche *Markstrahlen* parenchymatischen Gewebes. Sie dienen der Leitung und Speicherung der organischen Stoffe, auch dem Wassertransport. Den Abschluß des Stammes nach außen bildet die *Borke* aus toten Korkzellen und abgestorbenem Bast.

2. Mikroskopischer Aufbau:

Das Holz ist aus Zellen aufgebaut, die verschiedene Funktionen und Formen haben. Die funktionellen Aufgaben bestehen in der Wasserleitung (über Tracheiden und Tracheen), Leitung und Speicherung der Assimilate (durch Markstrahlen- und Holzparenchymzellen) sowie Festigung des Holzkörpers (Tracheiden, Holzfasern, Kernholzbildung). Das noch sehr einfach aufgebaute Nadelholz besitzt nur Tracheiden (etwa 95 %) und Parenchymzellen. Beim Laubholz treten neben Parenchymgewebe (pflanzliches Grundgewebe aus lebenden Zellen) und den Tracheiden (röhrenförmige Einzelzellen, deren Querwände noch nicht aufgelöst sind; Gefäße) noch Tracheen (zu einem Röhrensystem verbundene Zellen, deren Querwände aufgelöst wurden; dienen als wasserleitende Gefäße) auf, die bei manchen Laubhölzern die alleinigen Wasserleitungselemente sind, während die Tracheiden immer mehr zu reinen Festigungselementen oder auch zu Wasserspeichern werden.



PAPIER

Papier ist ein aus Fasern, vornehmlich Pflanzenfasern, durch Verfilzen, Verleimen und Pressen hergestellter blattartiger Werkstoff, dessen Rohstoffe Holz (Fichte, Tanne, Kiefer, Buche, Pappel, Birke, Kastanie, Espe, Eukalyptus und Stroh), mechanisch zu Holzschliff oder chemisch zu Zellstoff aufgeschlossen, Hadern (Leinen-, Baumwollumpen) sowie weitere Fasern (Hanf, Schlackenwolle, Glasfasern, Chemiefasern u. a.) sind.

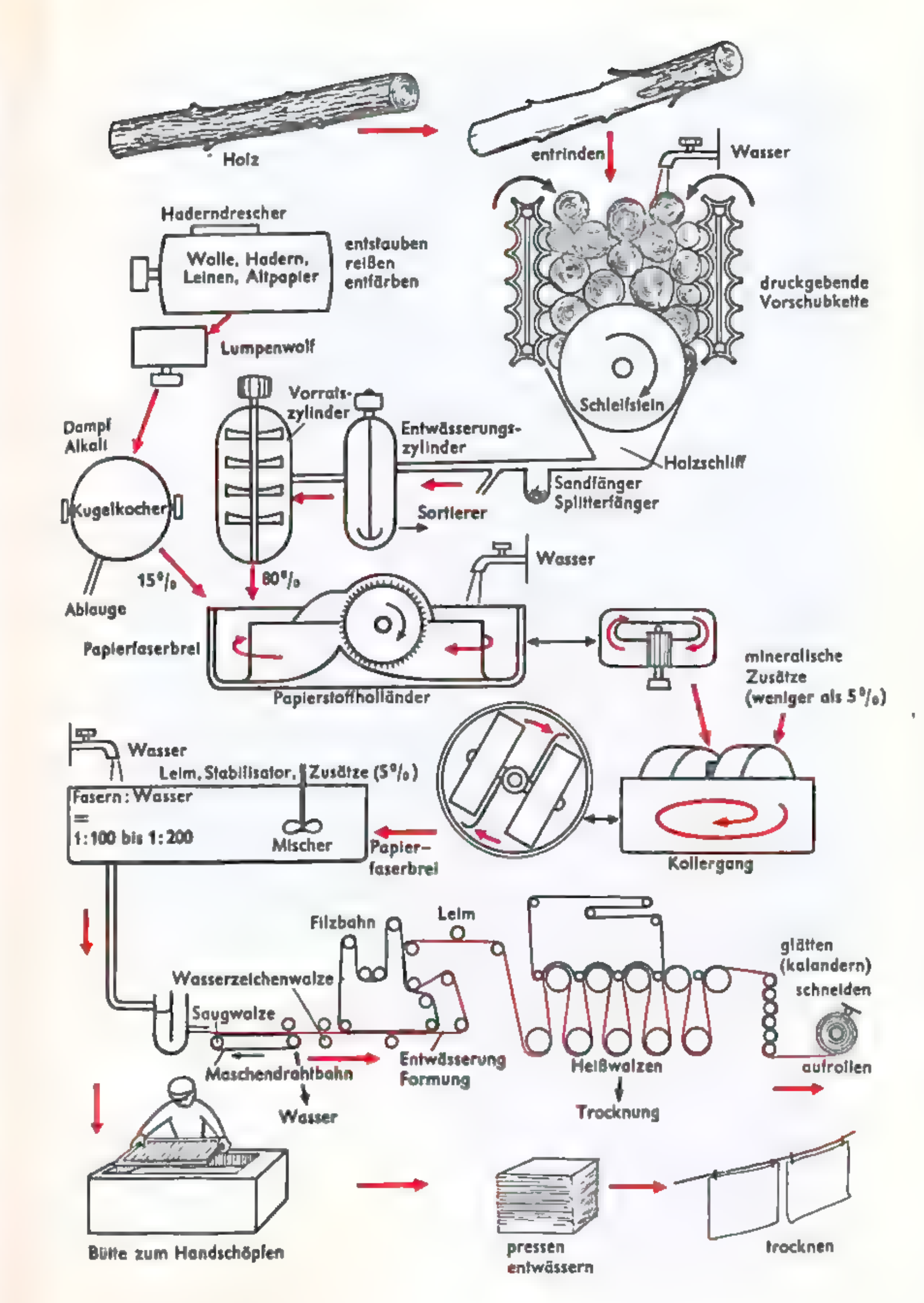
Vorprodukte der *Papierherstellung* sind Holzschliff, Zellstoff, Hadern, Altpapier. Dazu kommen noch Füllstoffe wie Kaolin, Bariumsulfat, Gips, Talkum, Calcium- und Magnesiumcarbonat, Titanoxid u. a., mit denen eine geschlossene Oberfläche erzielt und der Weißgehalt verbessert wird. Durch Zugabe von Leimen und Wachsen wird das Auslaufen und Durchschlagen von Tinte verhindert. Zur Herstellung naßfester Verpackungspapiere werden Harnstoff- und Melaminharzleime zugesetzt. Die Aufbereitung der Rohstoffe und ihre Mischung mit den Füllstoffen erfolgt im Kollergang und im Mahlholländer. Nach Erreichen des erforderlichen Mahlungsgrades wird die Mischung in Stoffbütten gespeichert, durch ständiges Rühren in gleichmäßiger Konzentration gehalten und über einen Sandfang bzw. Wirbelsichter der *Papiermaschine* zugeführt. Die Blattbildung erfolgt vornehmlich auf Langsiebmaschinen: Der dünne Faserbrei fließt in der Siebpartie der Maschine auf ein feines, endloses Metallgewebe, dessen rüttelnde Bewegung eine gute Verfilzung des Faservlieses gewährleistet. Am Ende des Siebteiles wird die Entwässerung durch Vakuumsauger und durch Gautschwalzen unterstützt. Die weitere Entwässerung der *Papierbahn* erfolgt auf der Pressenpartie der Maschine (2 bis 5 Naßpressen). Das restliche vorhandene Wasser wird dann in der Trockenpartie (bis zu 48 dampfbeheizte Zylinder) entzogen. Durch Kühlwalze, Glättwerke und Längsschneider gelangt das Papier schließlich zum Rollapparat.

Die *Papierausrüstung* umfaßt alle Maßnahmen, die dazu dienen, das von der Papier-, Karton- bzw. Pappenmaschine kommende Endlosbahnmaterial verkaufsfertig zu machen (z. B. Vor- und Umrollen, Abrißbeseitigung durch Klebestellen, Unterteilung der Bahn durch Rollen und Querschneiden (Formatschneiden), Glätten, Satinieren auf Kalandern, Prägen, Linieren, Sortieren, Verpacken, Klimatisieren bei 18 bis 25° C und 55 bis 70 % relativer Luftfeuchtigkeit, um Flachlage und gute Verarbeitungsfähigkeit zu erreichen).

Die Einteilung der *Papiersorten* kann nach mehreren Merkmalen erfolgen, am gebräuchlichsten ist diejenige nach den Verwendungszwecken: 1. Druck-, Schreib- und Zeichenpapiere, deren Kennzeichen hoher Weißgrad, gute Qualität, abgestimmte Oberflächenveredelung (Kunstdruck- oder maschinengestrichenes Papier) sind; 2. Pack- und Hüllpapiere mit hohen Festigkeitseigenschaften und häufig auch Sperrschichteigenschaften nach Beschichtung oder Kaschierung, wie Lebensmittelverpackungspapier, Kraftpapier, Seidenpapier, Zigarettenpapier u. a.; 3. sanitäre Papiere (weich, voluminös, saugfähig, hohe Dehnung, abgestimmte Naßfestigkeit); 4. technische und Spezialpapiere, an die vom Verwendungszweck her sehr hohe Güteanforderungen gestellt werden, z. B. Papiere der Photographie (Photorohpapier, Lichtpauspapier), des elektrotechnischen Sektors (Kondensatorpapier, Preßspan) u. a.

Bei den *Papierformaten* wird in der Hauptreihe A von der Bogengröße 1 m² mit dem Seitenverhältnis $1:\sqrt{2}$ ausgegangen. Durch Halbieren der Fläche entsteht jeweils das nächstkleinere Format (in cm)

DIN A 0	84,1/118,9	DIN A 5	14,8/21,0
DIN A 1	59,4/84,1	DIN A 6	10,5/14,8
DIN A 2	42,0/59,4	DIN A 7	7,4/10,5
DIN A 3	29,7/42,0	DIN A 8	5,2/7,4
DIN A 4	21,0/29,7		



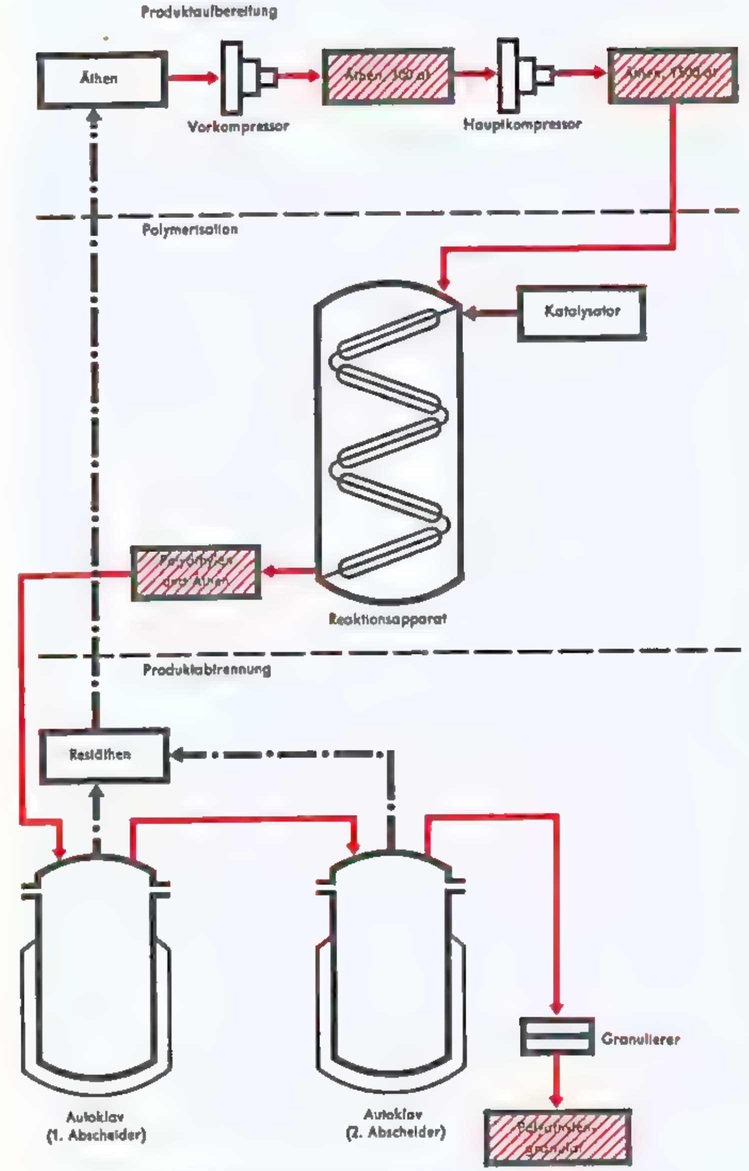
KUNSTSTOFFE I

Unter Kunststoffen versteht man allgemein Werkstoffe mit makromolekularem Aufbau, die entweder vollsynthetisch oder aus vorgebildeten natürlichen Makromolekülen hergestellt werden. Sie lassen sich chemisch, thermisch oder mechanisch in die gewünschte Form bringen. Ihre Eigenschaften beruhen in erster Linie auf dem strukturellen Aufbau (Gestalt und Größe) der Makromoleküle sowie dem Grad der Vernetzung (Verknüpfungsdichte der Polymerenketten) und erst in zweiter Linie auf der chemischen Zusammensetzung. Makromoleküle bestehen aus vielen durch Atombindung zusammengehaltenen Grundmolekülen (Monomeren), wobei die Anzahl der enthaltenen Monomere als Polymerisationsgrad gilt.

Gewinnung aus natürlichen makromolekularen Stoffen: Von den Polysacchariden hat lediglich die Cellulose Bedeutung zur Gewinnung technisch verwendbarer Kunststoffe erlangt und auch behalten. Sie kommt in der Natur als Gerüstsubstanz der Pflanzen vor. Die Abwandlung (Modifizierung) der Cellulose zu brauchbaren Kunststoffen erfolgt durch Veresterung oder Verätherung ihrer freien OH-Gruppen. Die Produkte lassen sich thermoplastisch verformen. Sie werden als Lackrohstoffe und Ausgangssubstanz für Reyon eingesetzt. Kunststoffe auf Proteinbasis werden aus Kasein, einem Eiweißbestandteil der Milch, hergestellt. Durch Härtung mit Formaldehyd gewinnt man Galalith. Dabei wird aus pulverisiertem Kasein und Wasser eine knetbare Masse gebildet, die durch Sintern in einer erhitzten Presse plastisch wird. Eine zweite Behandlung in der Presse dient der Formung. Danach erfolgt dann die Kondensation mit bis zu 18%iger Formaldehydlösung. Die Vernetzung mit den Methylengruppen (— CH_2) ergibt eine feste Struktur des Kaseins.

Synthese von Makromolekülen: Ausgangsmaterialien sind niedermolekulare Verbindungen (Monomeren), die aufgrund einer oder mehrerer funktioneller Gruppen (Gruppen eines Moleküls, z. B. OH-, COOH-, NH_2-, die chemische Reaktionen bewirken) in der Lage sind, mit sich selbst oder anderen Substanzen, die ebenfalls funktionelle Gruppen enthalten müssen, unter Bildung von Makromolekülen zu reagieren. Dabei werden als Ausgangsstoffe Produkte der Petrochemie wie Äthylen oder Propylen oder der Kohlechemie wie Acetylen eingesetzt. Die Methoden dazu sind die Polymerisation, Polyaddition und Polykondensation.

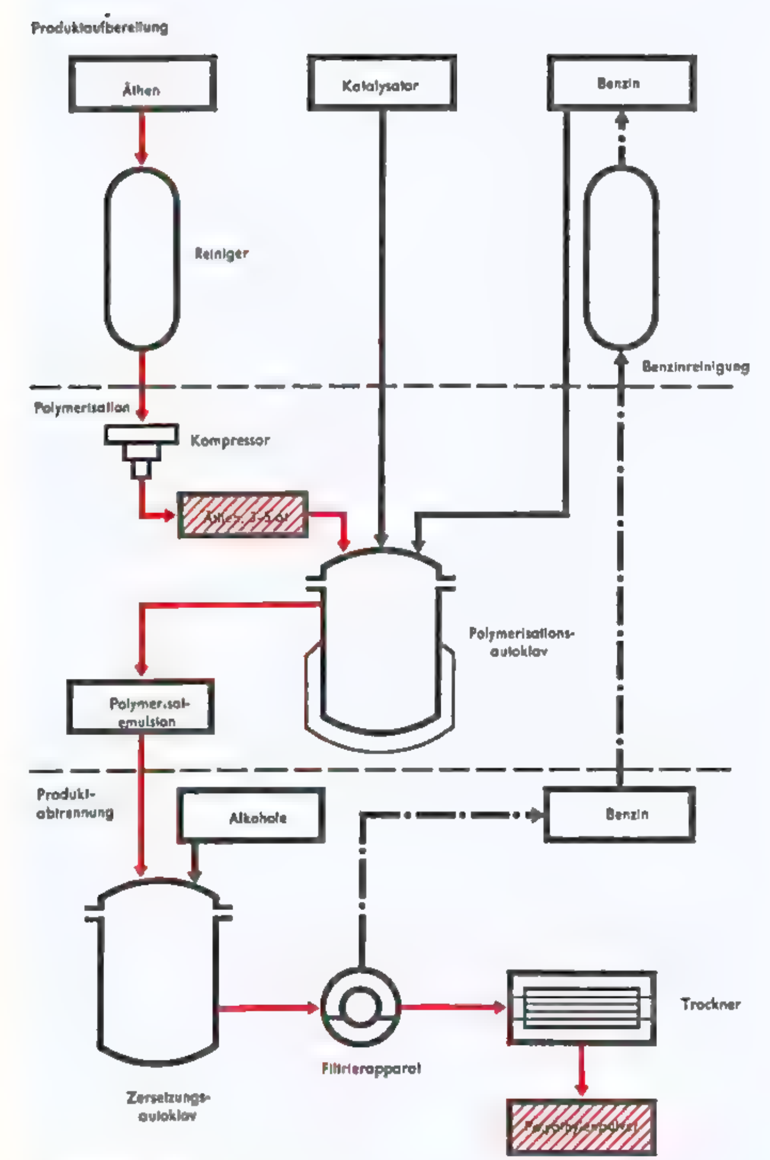
Bei der *Polymerisation* werden die Monomeren, ohne daß es zur Abspaltung von Nebenprodukten kommt, zu kettenförmigen Makromolekülen, aneinandergelagert. Voraussetzung ist jedoch, daß die Grundstoffe Kohlenstoffmehrfachbindungen aufweisen, da nur diese als ungesättigt bezeichneten Stoffe die notwendige Reaktionsfähigkeit besitzen. Eine Doppelbindung besitzt zum Beispiel das Äthylen: $H_2C = CH_2$. Die Polymerisationsreaktion (eine Kettenreaktion) kann dann von Licht, energiereicher Strahlung, Wärme oder Katalysatoren ausgelöst werden. Die Monomere werden dabei angeregt, so daß die Doppelbindungen aufbrechen $\left(\begin{array}{c} \mathrm{H}\;\;\mathrm{H} \\ |\;\;\;| \\ -\mathrm{C}-\mathrm{C}- \\ |\;\;\;| \\ \mathrm{H}\;\;\mathrm{H} \end{array}\right)$ und Radikale (ungesättigte Atomgruppen, d. h. Atomgruppen mit freien Valenzen) entstehen. Diese Radikale schließen sich zu Ketten (sogenannten Makroradikalen) zusammen. Dabei kommt es zu starker Wärmeentwicklung. Die Reaktion muß deshalb durch Wärmeabfuhr gesteuert werden; das geschieht entweder über die Wand des Reaktionskessels oder durch Rückfluß, wobei durch Verdampfen des Monomeren oder eines Lösungsmittels die Wärme entzogen wird. Zum Kettenabbruch kommt es dann entweder durch Verbrauch der Grundsubstanz oder durch Absättigung der freien Valenzen an den Kettenenden mittels Fremdgruppen.



Polyäthylenherstellung im Hochdruckverfahren

KUNSTSTOFFE II

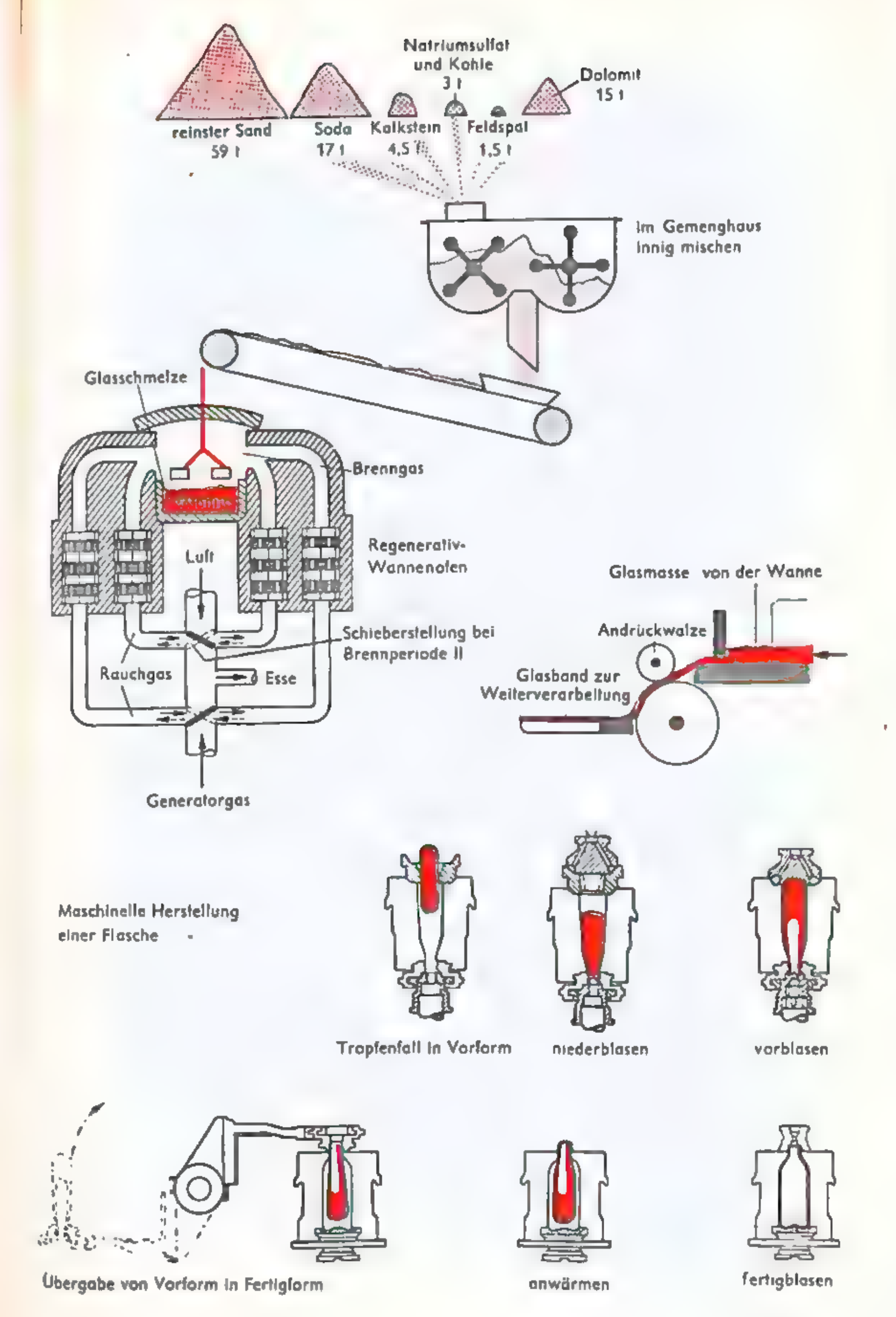
Es gibt verschiedene technische Verfahren der Polymerisation. Bei der Massepolymerisation (auch als Blockpolymerisation bezeichnet) wird das Monomere unverdünnt eingesetzt. Es kommt zum allmählichen Übergang vom verflüssigten Monomeren zum festen Polymerisat. Dabei ist meist aufgrund schlechter Temperatursteuerung die Reaktionsführung erschwert. Die Lösungspolymerisation (das Monomere ist in einem indifferenten Lösungsmittel gelöst) ist technisch leichter durchführbar. Bei der Emulsionspolymerisation, die die überragende Rolle in der technischen Anwendung spielt, werden durch Emulgatoren (z. B. Fettalkoholsulfonate) das Monomere und Polymere in stabiler Dispersion (Mischung, bei der ein Stoff in einen anderen in feinster Form verteilt ist) gehalten. Das Produkt kann durch Ausfällen mit Elektrolyten oder durch Verdampfen des Wassers gewonnen werden. Es fällt dann als Pulver an.
Bei der *Polykondensation* vereinigen sich eine Vielzahl von Grundmolekülen zu Makromolekülen unter gleichzeitigem Freiwerden niedermolekularer Spaltprodukte (H_2O, Alkohol, Halogenwasserstoff, Schwefelwasserstoff). Die Ausgangssubstanzen müssen mehrere funktionelle Gruppen tragen. Im Gegensatz zur Polymerisation benötigt bei der Polykondensation jeder einzelne Reaktionsschritt eine bestimmte Energiezufuhr (Wärmezufuhr). Zur Erhöhung des Molekulargewichts muß das Spaltprodukt aus dem Reaktionsgeschehen, da es sich um eine Gleichgewichtsreaktion handelt, entfernt werden; die dazu eingesetzten Kondensationsmittel können sauer oder basisch sein.
Die *Polyaddition* führt durch Aneinanderlagern gleichartiger oder verschiedener Monomeren zu hochmolekularen Verbindungen. Der Reaktionsmechanismus läuft dabei unter Protonenwanderung ab. Voraussetzung ist das Vorhandensein mehrerer reaktionsfähiger Gruppen im Molekül des Monomeren, z. B. -OH, $-NH_2$, -COOH. Im Gegensatz zur Polykondensation verläuft die Polyaddition ohne Abspaltung niedermolekularer Produkte, im Unterschied zur Polymerisation findet bei ihr eine Umlagerung im Molekül des Monomeren statt. Die Bindungen zwischen den einzelnen Monomeren werden ausschließlich durch Heteroatome, wie Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel, gebildet. Bei bifunktionellen Ausgangsgruppen bilden sich Fadenmoleküle, bei trifunktionellen entstehen raumvernetzte Strukturen.



Polyäthylenherstellung im Niederdruckverfahren

GLAS

Glas ist in seiner überwiegenden Masse ein nichtkristalliner, spröder, anorganischer, vorwiegend oxidischer Werkstoff. Er kann farblos oder gefärbt, klar oder durch Anwesenheit von Fremdteilchen getrübt sein. Glas entsteht durch Unterkühlung einer Schmelze ohne Kristallisation. Strukturell gesehen besteht Glas aus einem unregelmäßig räumlich verketteten Netzwerk bestimmter Bauelemente (z. B. SiO_4-Tetraeder), in das große Kationen eingelagert sind.
Die Verarbeitung und Formgebung des Glases erfolgt aus einer zähflüssigen Schmelze heraus, wobei die Zähigkeit, die Oberflächenspannung und die Neigung zur Kristallisation (Entglasung) von erheblicher Bedeutung sind; ein an die Formgebung anschließender Kühlprozeß soll thermische Restspannungen ausgleichen. Rohstoffe zur Glasherstellung sind Quarzsand, Soda, Natriumsulfat, Kalkstein, Dolomit, Feldspat, Pottasche, Borax, Salpeter, alkalihaltige Gesteine, Mennige, Baryt, Zinkoxid, Arsenik und Natriumchlorid. Durch Art und Menge der eingeschmolzenen Rohstoffe werden die Eigenschaften der Gläser bestimmt. In modernen Großanlagen werden die Rohstoffe über Becherwerke und Transportbänder oder pneumatisch in Bunker gefördert, aus diesen über automatische Waagen und Hängebahn oder Transportbänder zum Mischer, der als rotierender Trommel- oder Tellermischer ausgebildet ist, und dann z. B. in Hängebahnkübeln zum Ofen geleitet. Anfallende Scherben werden als Schmelzhilfe entweder im gebrochenen Zustand dem Gemenge zugemischt oder gesondert in den Ofen eingelegt. Die gesamte Anlage ist staubdicht abgeschlossen. Das Einlegen des Gemenges geschieht in Hafenöfen portionsweise mit der Kelle oder bei modernen Wannenöfen mit Einlegemaschinen in Form eines Teppichs auf die vorhandene Glasschmelzunterlage. Die sich im Ofen im Gemenge abspielenden Vorgänge laufen über mehrere Reaktionsstufen ab. Zunächst sintert das Gemenge, wobei sich Alkali- und Erdalkalisilicate sowie Doppelcarbonate bilden, die anschließend aufschmelzen und unter lebhafter Gasabgabe aus den reagierenden Rohstoffen den restlichen Quarzsand lösen. Hierzu sind Temperaturen um 1400° C notwendig. Am Ende dieser *Rauhschmelze* liegt eine inhomogene, stark schlierige und blasenreiche Schmelze vor. Im Verlauf des anschließenden Läutervorganges, der *Blankschmelze*, wird die Schmelze von allen sichtbaren Einschlüssen, insbesondere den Gasblasen, befreit. Dies geschieht durch Zugabe z. B. von Läuterungsmitteln. Die Läuterungsmittel entwickeln große Dampf- und Gasblasen, die die kleinen Blasen in sich aufnehmen, aufsteigen und aus der Schmelze austragen. Die aufsteigenden Blasen üben zugleich eine mechanische Mischwirkung auf die bis dahin inhomogene, schlierenreiche Schmelze aus. Gegen Ende des Schmelzprozesses steht die Schmelze ab und wird von 1400° C auf etwa 1200° C abgekühlt. Hierbei erhöht sich die Zähigkeit so weit, daß eine Verarbeitung bzw. Formgebung möglich ist.
Erzeugnisse der Flachglasherstellung:
1. *Tafelglas* wird als *Dünnglas, Bauglas (Fensterglas)* und *Dickglas* in Dicken hauptsächlich von 1 bis 7 mm durch Ziehen aus der Schmelze erzeugt und hat feuerblanke Oberflächen, ist also weder poliert noch geschliffen. 2. *Spiegelglas* wird durch Gießen und Walzen sowie anschließendes Planschleifen und Polieren hergestellt. Normale Dicken sind 3 bis 10 mm, unter Umständen bis 50 mm. 3. *Guß-, Draht- und Ornamentglas* wird durch Gießen und Auswalzen hergestellt und ist entweder auf beiden Seiten glatt oder ein- oder beidseitig ornamentiert bzw. mit einer Drahteinlage versehen. 4. *Sicherheitsglas* umfaßt *Einscheiben-* und *Verbundsicherheitsglas*. Ersteres wird durch Vorspannen (gesteuerte äußere Abschreckung) bei der Kühlung des Glases erzeugt, wobei eine höhere Festigkeit erreicht wird. Außerdem wird dadurch die Entstehung scharfkantiger Splitter verhindert. Verbundsicherheitsglas besteht aus zwei Flachglasscheiben mit zwischengeklebter Kunststoffschicht.



KERAMIK I

Als Keramik bezeichnete man früher die Werkstoffe der Tonwarenindustrie, heutzutage zählen dazu auch eine Vielzahl nichtsilikatischer Werkstoffe. Eine Einteilung nach tonkeramischen und sonderkeramischen Werkstoffen liegt nahe, doch ist heute noch die traditionelle Einteilung in Grob- und Feinkeramik üblich.

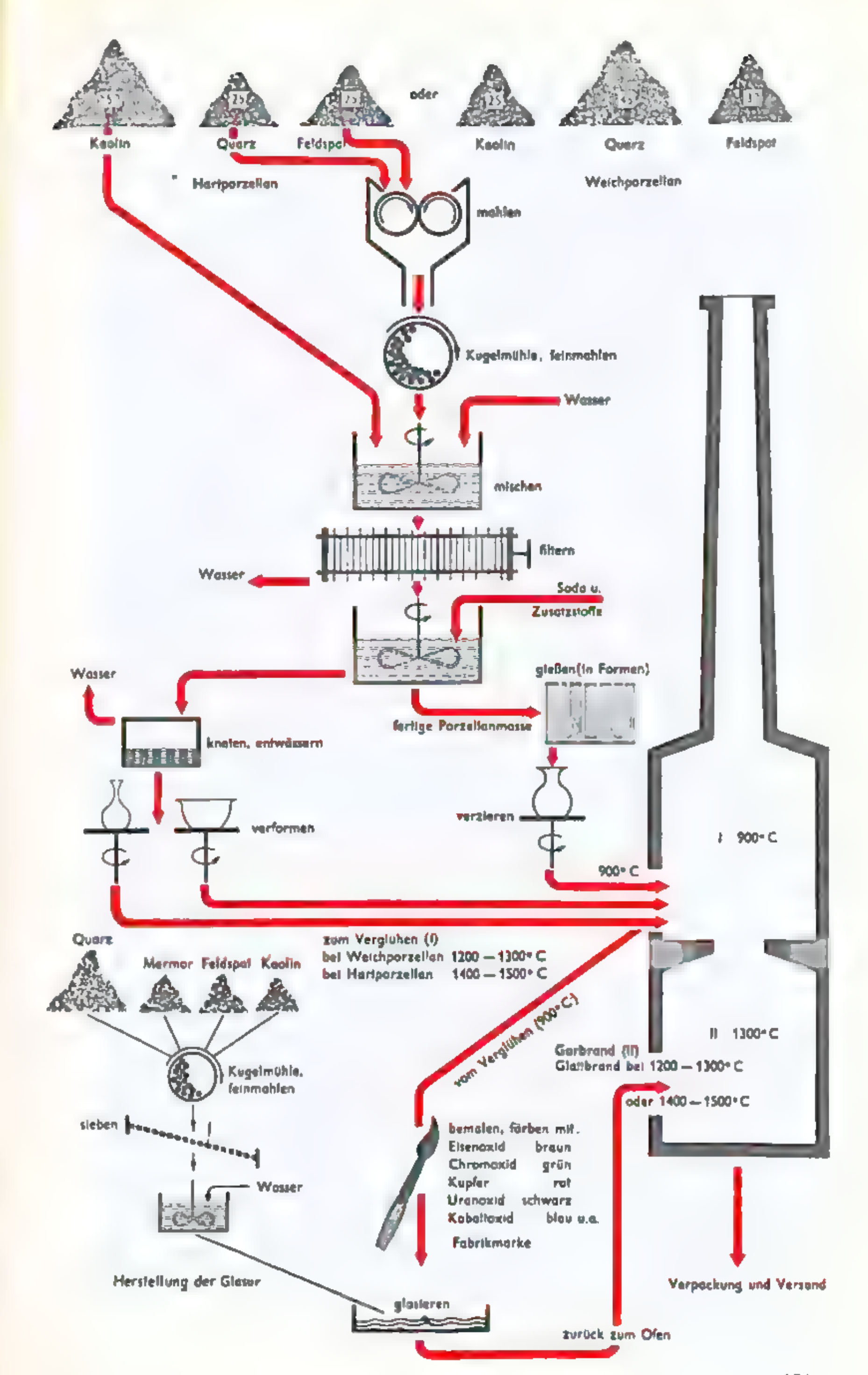
Grobkeramik:

Grobsteinzeug ist durch einen glasierten oder unglasierten, dichten, im allgemeinen farbigen Scherben charakterisiert. Dieser garantiert hohe mechanische Festigkeit, geringe Wasseraufnahme und Säurebeständigkeit. Neben Kanalisationssteinzeug werden aus Steinzeug landwirtschaftliche Gefäße und insbesondere chemisch-technische Geräte hergestellt. Als Rohstoffe dienen Steinzeugtone, Quarzsand und flußmittelhaltige Rohstoffe wie Feldspäte oder feldspathaltige Gesteine. Die Formgebung kann ähnlich wie in der Ziegelindustrie sowohl bildsam als auch trocken erfolgen. Für die bildsame Formgebung ist die Herstellung einer bildsamen Masse erforderlich, dazu müssen die Rohstoffe Sand, Feldspat (oder feldspathaltige Gesteine) fein zerkleinert werden (ebenso für die Herstellung von Massen, die trocken aufbereitet werden, erforderlich). Die Mischung mit den tonmineralhaltigen Rohstoffen erfolgt für die bildsamen Massen als Suspension unter Verwendung von entsprechenden Mischaggregaten, für die trocken zu verwendenden Massen in Trockenmischern. Nach der Formgebung und einem sorgfältigen Trockenvorgang werden die Grobsteinzeugerzeugnisse in Kammer- oder Tunnelöfen gebrannt; die Temperatur liegt je nach der Art des Erzeugnisses zwischen 1100 und 1400° C. Sofern die Erzeugnisse glasiert werden, werden sie vor dem Brennen meist durch Tauchen oder Spritzen mit einer feldspatreichen Glasur überzogen.

Feuerfeste Erzeugnisse: Feuerfeste *Baustoffe* werden verwendet, wo im Dauerbetrieb Temperaturen über 1000° C auftreten (s. feuerfest). Wichtige Typen: Silikasteine (93% SiO_2), Tonerdesilicasteine (Quarzschamottesteine, Schamottesteine, 70 bis 50% SiO_2, 12 bis 44% Al_2O_3), tonerdereiche Steine (Schamottesteine mit Korundzusatz, Mullitsteine, Sillimanitsteine, Korundsteine, 44 bis 100% Al_2O_3, 50 bis 0% SiO_2). Die Herstellung der feuerfesten Steine erfolgt durch Formen, Gießen, Pressen oder Stampfen. Die Brenntemperatur liegt in Abhängigkeit von der Steinqualität zwischen 1300 und 1700° C. Verwendet werden kohle-, öl- und gasbeheizte Einzelöfen, Ringöfen, Kammerringöfen und Tunnelöfen. *Silikasteine* werden aus Quarzit hergestellt. Für das Brennen sind Temperaturen bis 1450° C notwendig.

Feinkeramik:

Feinsteingut ist ein feinkeramisches Erzeugnis mit einem weißen, porösen und beim Anschlagen klingenden Scherben, der nicht transparent ist und im allgemeinen eine durchsichtige Glasur trägt. Als Rohstoffe werden in unterschiedlichen Mengenverhältnissen Tone, Kaoline, Quarz, Feldspat, Erdalkalicarbonate und wasserhaltige Magnesiumsilicate (Talk) eingesetzt. Charakteristisch für Steingutmassen ist die überwiegende Verwendung von weißbrennendem Ton; Kaoline werden sowohl im geschlämmten Zustand als auch als Rohkaoline nach Mahlung in Trommelnaßmühlen als Rohstoff verwendet. Quarz dient als Magerungsmittel und wird in Form von gemahlenem Quarzsand zugesetzt. Als Flußmittel werden Feldspäte, v. a. die preiswerteren Feldspatsande und Pegmatite mit weißer Brennfarbe eingesetzt. Als Erdalkalicarbonate sind vor allem Calciumcarbonat in Form von Kreide, Kalkspat und Marmor sowie Dolomit und Magnesit zu nennen. Aufgrund der unterschiedlichen Massezusammensetzung kann zwischen Hartsteingut (Feldspatsteingut), Weichsteingut (Kalksteingut) und Gemischtsteingut unterschieden werden. Der Rohbrand von Hartsteingut erfolgt u. a. im Tunnelofen (s. Abb. 1)als sogenannter Biskuitbrand bei 1260 bis 1330° C.



KERAMIK II

Zur Herstellung von Steingutgeschirrmassen werden die Tone nach mechanischer Vorzerkleinerung (Tonwolf, Tonschnitzler) in Rührquirlen oder Schraubenquirlen aufgeschlämmt; anschließend werden sie abgesiebt, um Verunreinigungen zurückzuhalten, und einem Mischbottich mit Rührwerk zugeführt. Die nicht bildsamen Rohstoffe (z. B. Quarzsand, Feldspatsand, Biskuitscherben) werden vorzerkleinert und in Trommelnaßmühlen vermahlen. Dann werden sie ebenfalls dem Mischbottich zugesetzt. Die aufgeschlämmte Fertigmasse wird homogenisiert, abgesiebt und auf Filterpressen bis auf einen Feuchtigkeitsgehalt von 20 bis 23 % abgepreßt. Bei der Herstellung von Wandfliesen werden die Filterkuchen getrocknet, auf Siebkollergängen zerkleinert (2 bis 4 mm), durch Wasserzugabe auf Preßfeuchte gebracht und einem Vorratsbunker als Granulat zugeführt. Neuerdings wird auch das Granulat in Sprühtürmen hergestellt, wobei Schlicker in Heißluft verdüst wird. Die Wandfliesen werden in Stahlmatrizen auf hydraulisch oder mechanisch betriebenen Pressen hergestellt.

Als *Porzellan* bezeichnet man feinkeramische Erzeugnisse mit und ohne Glasurüberzug, die einen dichten, transparenten sowie im allgemeinen weißen Scherben aufweisen. Hartporzellan ist gegenüber dem Weichporzellan flußmittelärmer sowie tonerdereicher, es verlangt deshalb eine höhere Garbrenntemperatur, damit ein dichter und transparenter Scherben entsteht. Die Bezeichnung Weichporzellan bezieht sich auf die niedrigere Brenntemperatur bei höherem Feldspatgehalt (bereits ab 1000° C reagieren Feldspäte mit anderen Rohstoffen, schmelzen ab etwa 1200° C und wirken somit als Flußmittel).

Die Porzellanmasse wird aus geschlämmten Kaolinen, aus Quarz in Form von Quarzmehl oder als Quarzanteil in hochwertigen Pegmatiten oder Kaolinen und aus Kalifeldspat zusammengesetzt. Alle Rohstoffe müssen eine weiße Brennfarbe besitzen und frei von Eisen sein. Die Hartmaterialien (Quarz, Feldspat) werden auf Korngrößen unter 60 μm in Naßtrommelmühlen zerkleinert. Darauf erfolgt das Suspendieren des Kolbens und das Mischen in einem Rührquirl. Setzt man hierbei Elektrolyte (etwa 0,5 % Soda oder Wasserglas) zu, so gelingt es, bei Wassergehalten von 26 bis 35 % einen noch gießbaren Schlicker zu erhalten, der in Gipsformen (s. Abb. 2) zu vielgestaltigen Teilen vergossen werden kann (wobei die Gipsform dem Schlicker einen Teil des Wassers entzieht). Zur Bereitung von bildsamen Massen (20 bis 30 % Wasser) wird die Rohstoffsuspension auf Filterpressen entwässert; die gewonnenen Filterkuchen werden zum Mauken gegeben. Für das Verarbeiten durch Eindrehen in Gipsformen werden die Filterkuchen mit Hilfe einer Masseschlagmaschine oder einer Vakuumpresse homogenisiert und entlüftet. Die Formgebung geschieht durch Eindrehen (s. Abb. 3) in Gipsformen (mit einer Stahlschablone, z. B. für Tassen) oder Überdrehen (s. Abb. 4) auf eine Gipsform (bei Flachware, z. B. Tellern). Nach einem kurzen Trockenvorgang kann der lederharte Rohling der Gipsform entnommen werden, woran sich weitere Arbeitsgänge, wie Entgraten, Verputzen oder Angarnieren von Henkeln, anschließen. Für Trockenpressen in Stahlmatrizen (4 bis 8 % Wasser) oder Feuchtpressen in Stahlformen (10 bis 14 % Wasser) müssen die Filterkuchen getrocknet, gekollert und wieder auf die Verarbeitungsfeuchtigkeit gebracht werden. Diese Massen sind dabei rieselfähig und können auch auf vollautomatischen Pressen zur Herstellung von Massenartikeln (Sicherungspatronen, Schalterteile, Niederspannungsisolatoren, Flaschenverschlüsse, Isolierperlen u. a.) verarbeitet werden. Die Rohlinge werden vor dem Brand getrocknet. Für Hartporzellan ist das zweimalige Brennen charakteristisch. Einem Glühbrand im Rundofen (s. Abb. 5) bei rd. 1000° C folgt das Glasieren durch Tauchen oder Spritzen des noch gut saugenden Scherbens; erst im zweiten Brand, dem Glattbrand bei 1380 bis 1445° C, sintert der Scherben dicht, die Glasur fließt zu einer durchsichtigen Glasschicht aus.

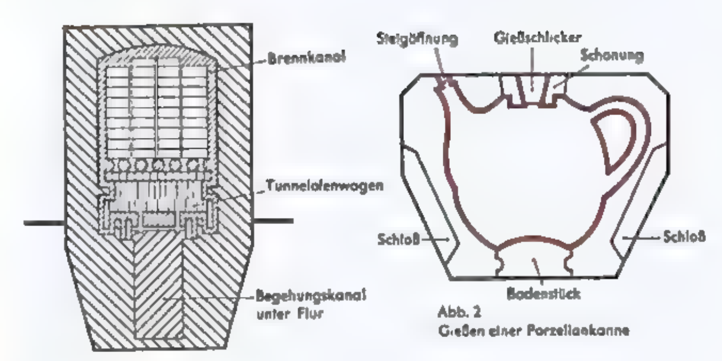


Abb. 1
Tunnelofen zum Brennen von Steingut

Abb. 2
Gießen einer Porzellankanne

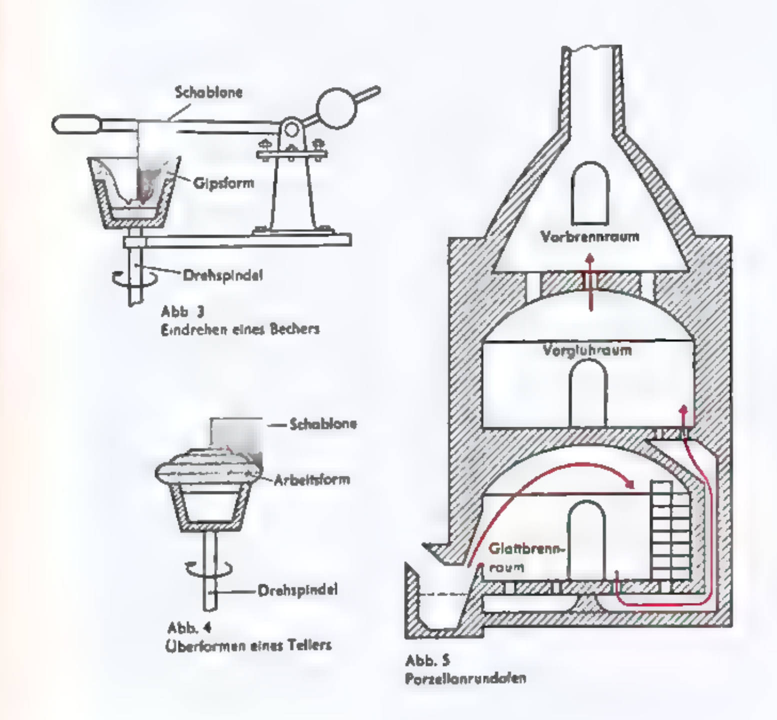


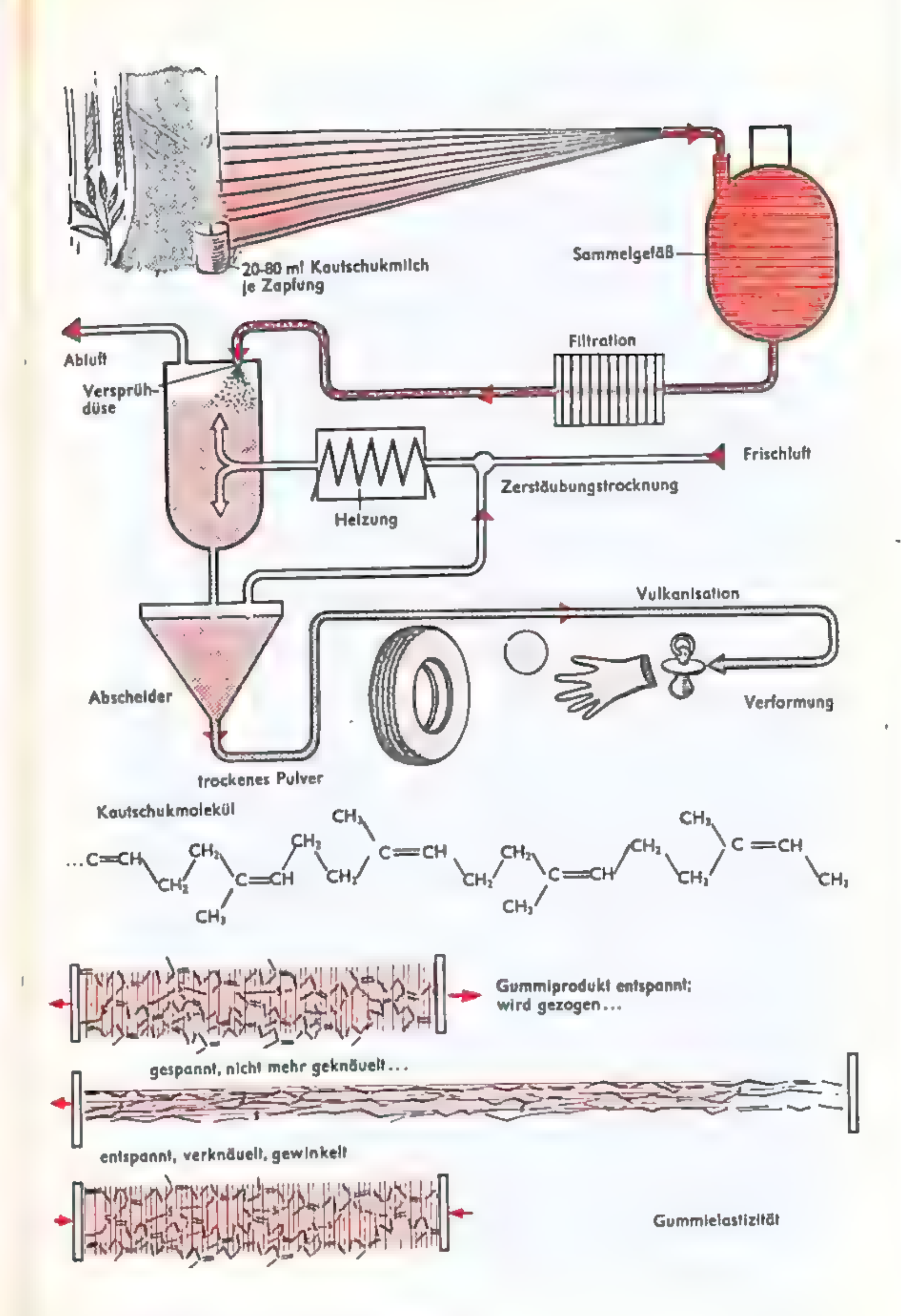
Abb. 3
Eindrehen eines Bechers

Abb. 4
Überformen eines Tellers

Abb. 5
Porzellanrundofen

GUMMI

Gummi ist das vulkanisierte Endprodukt aus natürlichem und zum Teil künstlichem Kautschuk. Natürlicher Kautschuk ist in feinsten Tröpfchen in der Milch des Kautschukbaumes (Hevea brasiliensis) enthalten, der in tropischen Breiten in Plantagen angebaut wird; er erreicht Höhen von 10–20 m und kann 50–80 cm dicke Stämme bekommen. Die Rinde wird durch schräge Schnitte angeritzt; ein Kautschukbaum kann täglich etwa 7 g Kautschuk liefern. Für einen Autoreifen müssen 200 Kautschukbäume einen ganzen Tag lang „bluten". Um zur gebrauchsfertigen Gummiware zu kommen, muß der zu 25–35 Gewichtsprozent in der Baummilch enthaltene tröpfchenförmige Rohkautschuk durch Versprühen und Wegtrocknen des Milchwassers oder durch Ansäuern, Ausfällen, Auswaschen und Walzen oder durch schichtenweises Ausräuchern aus schließlich großen geräucherten Rohkautschukklumpen gewonnen werden. Der Rohkautschuk wird gereinigt, mit Chemikalien und Füllstoffen versetzt und schließlich mit Schwefel vulkanisiert. Der jetzt entstandene Gummi ist hochelastisch. Diese Eigenschaft wird durch die Art und die Form der Kautschukmoleküle verursacht. Natürlicher Kautschuk besteht aus kettenförmig miteinander verbundenen Isoprenmolekülen. Ein Kautschukmolekül enthält mehr als 2000 solcher Grundbausteine in linienförmiger Bindung. Das vulkanisierte Polyisoprenmolekül besitzt einen gewinkelten Bau und polare Gruppen. Wird nun an einem Gummifaden gezogen, so kann man die Winkel und die Lage der einzelnen ineinander verknäulten Kautschukmoleküle verändern und sie auseinanderziehen. Läßt der Zug nach, dann lagern sich die Moleküle wieder in ihre ursprüngliche Form zurück. Da hierbei keine bleibenden mechanischen Veränderungen auftreten, kann man diesen Vorgang so lange wiederholen, bis schließlich aus anderen Gründen — durch Alterung nach Sauerstoffeinwirkung und starker Lichtbestrahlung — der Gummi brüchig und rissig wird. Die gummiartige Eigenschaft erhält der Kautschuk aber erst, nachdem die Kautschukmoleküle beim Vulkanisieren über Schwefelbrücken geringfügig miteinander verknotet und verkettet worden sind. Unbehandelter Rohkautschuk ist stark wärmeempfindlich, aus ihm könnte man keine Autoreifen herstellen.
Wegen seiner außerordentlichen elastischen Eigenschaft ist Gummi Rohmaterial für fast 50000 verschiedene Erzeugnisse. Gummi wird großtechnisch erst seit etwa 100 Jahren hergestellt (erster Luftreifen 1845), erst seit etwa 40 Jahren übersteht ein Autoreifen mehr als 10000 km Fahrt — aber schon seit nahezu 1000 Jahren konnten die Eingeborenen tropischer Gebiete den wolfsmilchartigen Saft des Kautschukbaumes zu gummiähnlichen Waren (Spielbälle) verarbeiten.
Heute werden hauptsächlich in Afrika, Südamerika und Südostasien jährlich nahezu 2 Millionen Tonnen Naturkautschuk erzeugt. Mehr und mehr erobert jedoch der synthetische Kautschuk den Markt (s. S. 156).



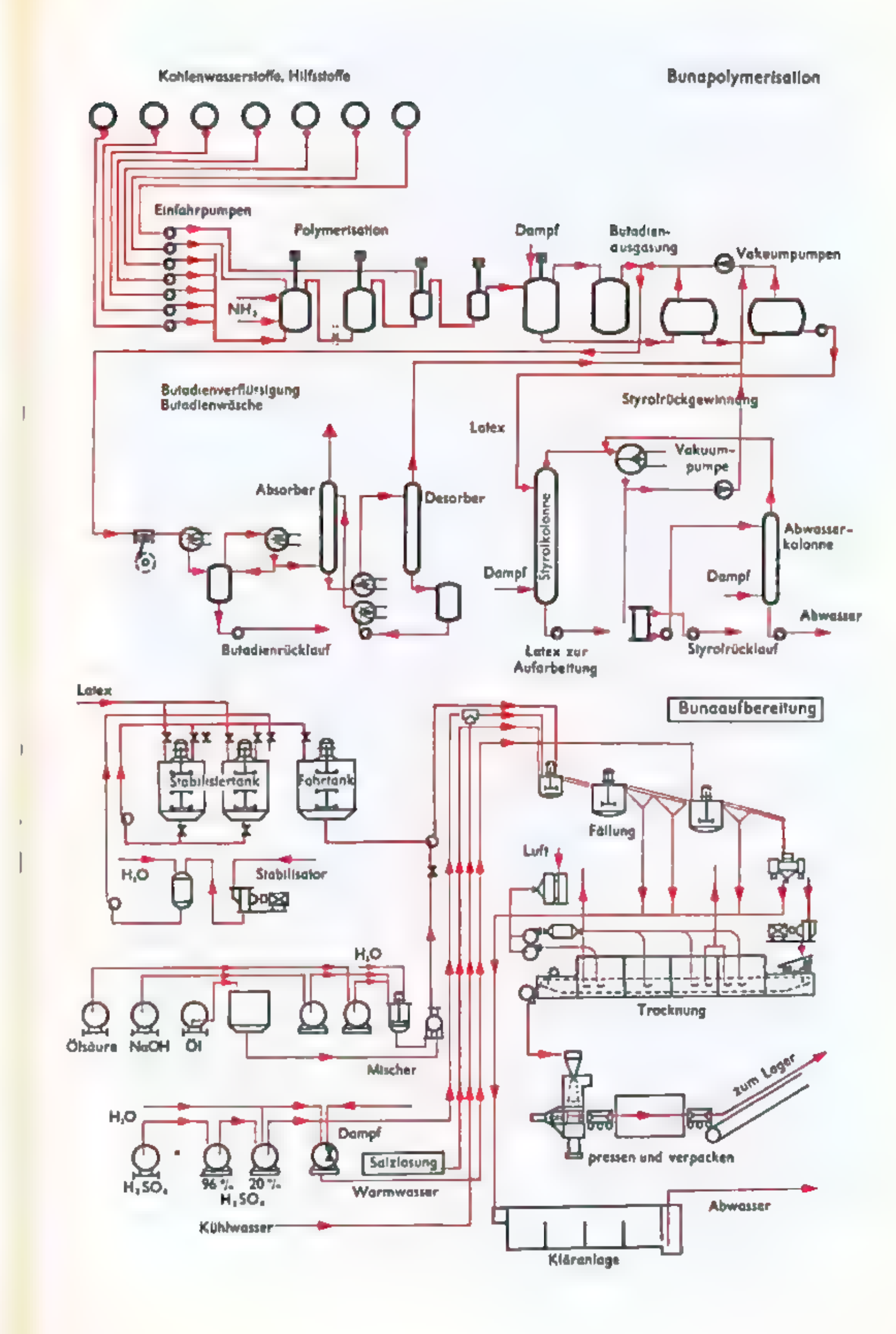
BUNA

Buna ist der wichtigste Vertreter der Synthesekautschuke. Er hat seinen Namen von einem Kautschuk, der durch Blockpolymerisation von *Bu*tadien mittels *Na*trium als Katalysator hergestellt wurde. Heute wird überwiegend die Mischpolymerisation in wäßriger Phase von Butadien und Styrol durchgeführt. Durch das früher noch bei etwa +50°C durchgeführte Verfahren entsteht Buchstabenbuna (z. B. Buna S = Butadien-*S*tyrol-Kautschuk). Neuere Aktivatoren ermöglichen auch eine Mischpolymerisation bei etwa +5°C, die zu dem heute üblichen Kaltkautschuk führt. Durch Variation der Monomeren, ihrer Verschnittverhältnisse (hauptsächlich etwa 75% Butadien und 25% Styrol) und der Polymerisationsrezeptur entsteht eine Vielzahl von Bunatypen, die durch unterschiedliche Aufarbeitungsbedingungen und Zusätze, z.B. Öle (ölplastifizierter Kautschuk) oder Ruß + Öl (Rußmasterbatche) noch erweitert werden. Neuerdings polymerisiert man auch Butadien oder Isopren mittels Zieglerkatalysatoren zu einem Produkt, das in seinem sterischen Aufbau dem Naturkautschuk gleicht, z.B. BUNA CB (Poly-cis-Butadien).

Bei der Emulsionspolymerisation bei etwa +5°C befinden sich die zu polymerisierenden Kohlenwasserstoffe (z.B. Butadien und Styrol) in Emulsion und enthalten in sich einen Bestandteil des Aktivatorsystems gelöst. Der zweite Teil des Aktivatorsystems ist in der wäßrigen Phase enthalten. Er löst an der Phasengrenzfläche durch Zerfall das gesamte Aktivatorsystem aus, wodurch die Startreaktion der Polymerisation beginnt. Eine regelnde Substanz ermöglicht es, in Abhängigkeit von ihrer Konzentration durch Kettenabbruch eine mittlere Molekülgröße des Polymerisates einzustellen. Die gebildeten Makromoleküle haben eine Fadenstruktur mit Verzweigungen, sogenannte Seitenketten. Die Polymerisation der Monomeren wird nach etwa 60%igem Umsatz unterbrochen. Aus dem entstandenen Latex, der einer natürlichen Kautschukmilch ähnlich ist, werden die nicht umgesetzten Monomeren abgetrieben. Nach Zusatz von Stabilisatoren wird durch Säure und Salz der Latex zum Festkautschuk aufgearbeitet. Die anfallenden Kautschukkrümel werden gewaschen und in mehreren Stufen getrocknet. Danach werden sie zu Ballen von rd. 30 kg gepreßt.

Zur Herstellung von Gummiartikeln werden dem Buna in Knetern oder auf Mischwalzen solche Zusätze beigemischt, die mitbestimmend für die Verarbeitbarkeit der Mischung sind bzw. die Eigenschaften der Vulkanisate beeinflussen. Derartige Substanzen sind: Öle, Paraffine, Fettsäuren, Teere, Bitumen, Ruß, Zinkoxid, Kreide, Kieselsäure, Kaolin, ferner anorganische und organische Farbstoffe. Zur Vulkanisation, die meist unter Druck bei etwa 150°C durchgeführt wird, enthält die Mischung noch Schwefel und Vulkanisationsbeschleuniger, z. B. Merkaptobenzothiazol. Die Vulkanisationszeit schwankt zwischen wenigen Minuten und mehreren Stunden.

Bei der Vulkanisation erfolgt die Verknüpfung der Fadenmoleküle zu einem dreidimensionalen Netzwerk. Die Vernetzungsstellen werden vorzugsweise durch Schwefel gebildet. Dabei verliert der Kautschuk weitgehend seine plastischen Eigenschaften. Er erhält dafür die bekannten Eigenschaften, wie Reversion nach Dehnung, Gummielastizität und Abriebsfestigkeit. Die Haupteinsatzgebiete des Buna: Autoreifen, zahlreiche technische Artikel, Förderbänder usw. Andere Synthesekautschuke, wie z.B. Perbunan (Butadien-Acrylsäurenitril-Mischpolymerisat), zeichnen sich durch hohe Quellbeständigkeit gegenüber Fetten und Benzinkohlenwasserstoffen aus.

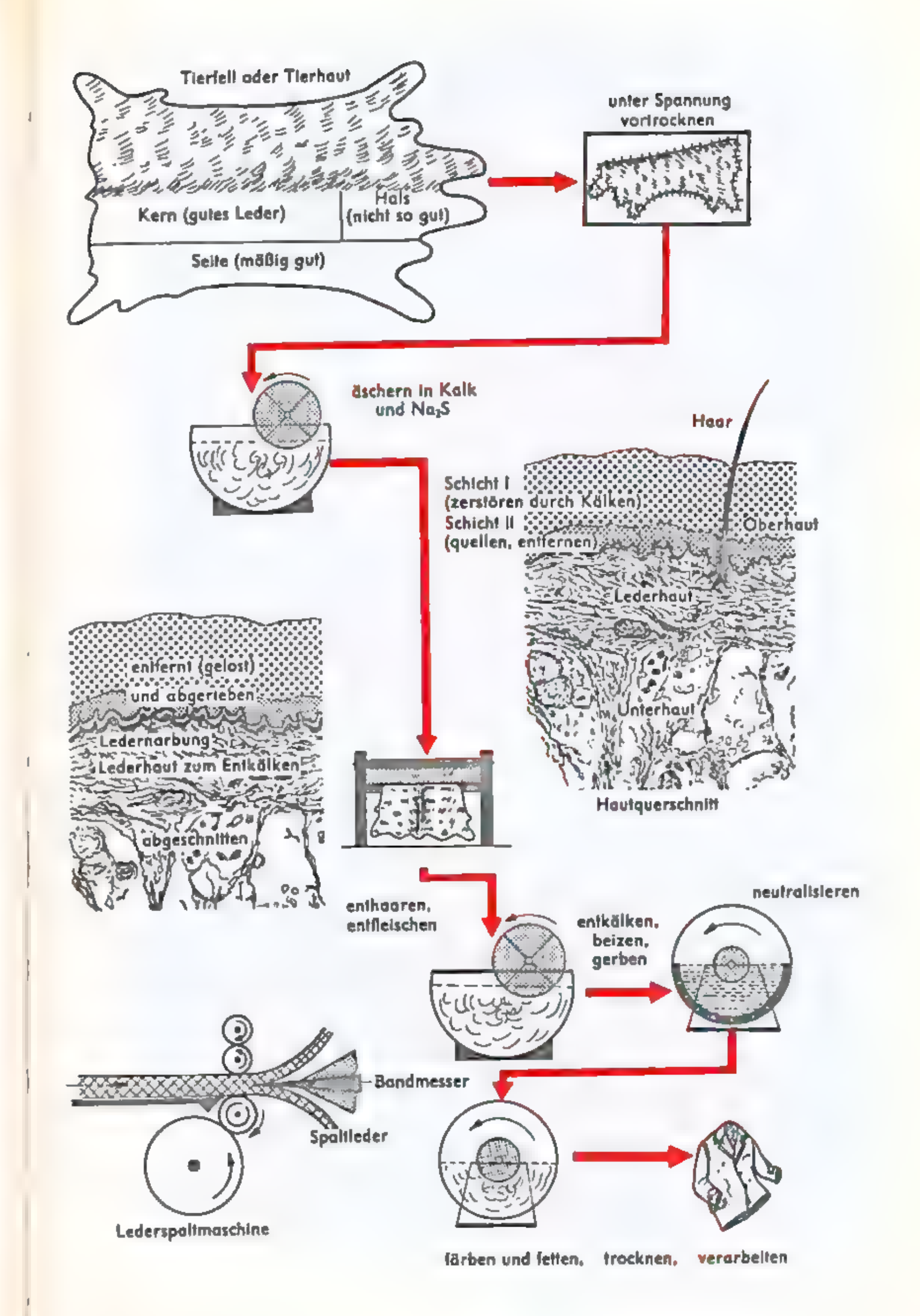


LEDERHERSTELLUNG I

Die Lederherstellung ist durch einen stetigen Wechsel chemischer und mechanischer Arbeitsprozesse (bzw. deren Kombination) gekennzeichnet. Die nach der Schlachtung mit Salz partiell entwässerte und konservierte Haut wird in Wasser unter Zusatz bakterizider und benetzender Hilfsmittel geweicht (Herstellung der gerbfertigen Blöße). Das *Weichen* erfolgt in einem gesonderten Arbeitsraum, der sogenannten *Wasserwerkstatt*, in der Regel in Bottichen, d. h. zementierten Gruben, oder in Haspeln, d. h. Gruben, deren Böden halbrund ausgebildet sind und deren Flüssigkeit durch ein angetriebenes, über die ganze Breite der Grube gehendes Wasserrad in umlaufender Bewegung gehalten wird. Neuerdings weicht man auch in Gerbfässern (zylindrische Gefäße aus Holz oder glasfaserverstärktem Polyester), die um ihre Achse mit Motorkraft gedreht werden, in der Mantelfläche eine große Öffnung zum Be- und Entladen und an der Innenseite des Mantels zahlreiche Zapfen oder Bretter als Schikanen zur Bewegung der Häute haben. Die *Enthaarung* nach dem Weichen erfolgt ebenfalls in Haspeln oder heute zunehmend in Gerbfässern und erfordert eine alkalische Behandlung mit Natriumsulfid (Na_2S). Je nach Konzentration werden die Haare hierbei nur gelockert oder vollkommen zerstört. Die Haarzerstörung nimmt man meist im Faß vor, wobei nach Abschluß der Bearbeitung mit Na_2S der entstandene Haarbrei heruntergerieben und -gespült wird. Im Falle der Haarlockerung müssen die Haare auf einer Walzenmaschine mit Messerwalzen von der Haut gestrichen werden. Dann kommen die Häute in den Äscher (unter dem Einfluß von Calciumhydroxid wird das Hautfasergefüge durch Quellung sowie eine ganz mild wirkende Hydrolyse aufgeschlossen). Nach dem Äscher werden die Blößen in Bottiche mit leicht angewärmtem Wasser eingelegt, wodurch sie etwas geschmeidiger werden. Diese ganz geringe Entquellung besonders der Außenzonen ist für das Entfleischen auf Walzenmaschinen und für das *Spalten* (d. h. Egalisieren) der Haut mittels *Spaltmaschinen* (Abb. 1) Voraussetzung. — Dieser Bearbeitung folgt das Entkälken (Entfernen des Äscherkalks durch Behandlung der Blößen mit schwachen organischen Säuren). In der Regel soll die Haut dabei noch nicht ihre gesamte Alkalität verlieren. Es bleibt vielmehr noch eine etwas alkalische Mittelzone erhalten. Einerseits ist die geringe Alkalität für das nun anschließende Beizen, andererseits für die nachfolgende (vegetabilische) Gerbung vorteilhaft.

G e r b u n g :

Im Gegensatz zu vorbereitenden Arbeiten erfolgt die Gerbung im sauren Milieu. Man unterscheidet im wesentlichen zwei Methoden: 1. Gerbung mit vegetabilischen oder synthetischen Gerbstoffen: Die Gerbung wird mit Lösungen sehr niedriger Gerbstoffkonzentration (10 bis 25 g Reingerbstoff/l) begonnen. Stufenweise wird die Konzentration der Gerbbrühen erhöht, bis die Gerbung bei relativ hohen Gerbkonzentrationen (200 bis 400 g/l) beendet wird. Der Gerbstoff wird im „Gegenstrom" zu den Häuten, allerdings stufenweise von Gerbgefäß zu Gerbgefäß, geführt (Gegenstromprinzip). Dies hat einerseits den Vorteil, daß die noch nicht gegerbte empfindliche Blöße nur mit wenig adstringenten, d. h. wenig gerbwirksamen Gerblösungen in Berührung kommt und daß andererseits der Gerbstoff bestmöglich „ausgezehrt" wird. Zur *Angerbung* hängt man die Blößen zunächst in einen *Farbengang*, eine Reihe von Gerbgruben, in denen die Häute täglich in immer konzentriertere Brühen umgehängt werden, bis sie von Gerbstoff gerade durchdrungen sind. Die heute fast durchweg üblichen Gerbverfahren bedienen sich nach dem Farbengang entweder der Gerbung in Gruben (Einhängen in konzentrierten Brühen) oder im Gerbfaß. Bei diesen Verfahren verwendet man mit Vorteil anteilig synthetische Gerbstoffe, die aus Phenolen und Schwefelsäure mit Formaldehyd kondensiert werden. Man erhält eine Aufhellung der Lederfarbe, vermeidet die Oxydation der vegetabilischen Gerbstoffe, die Abscheidung unlöslicher Anteile und damit Gerbstoffverluste.



LEDERHERSTELLUNG II

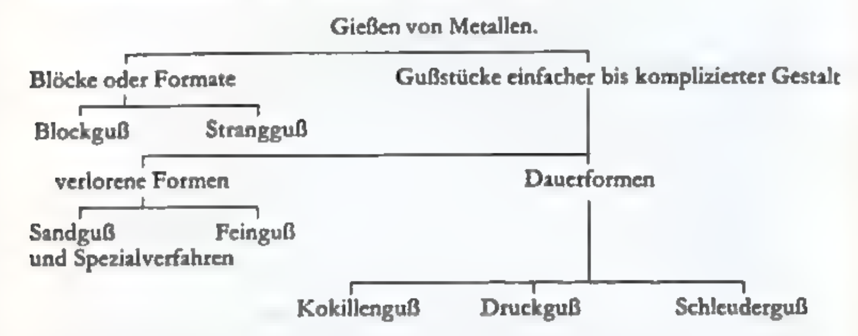
Immer häufiger arbeitet man nach neueren Gerbverfahren, bei denen man auf das Gegenstromprinzip verzichten kann. Bei ihnen schaltet man eine *Vorgerbung* mit Mineralgerbstoffen oder mit bestimmten synthetischen Gerbstoffen vor, arbeitet im Gerbfaß und erreicht so schon, daß die Haut innerhalb 24 Stunden durchdrungen wird und sich das Hautfasergeflecht erheblich entwässert, so daß anschließend vegetabilischer Gerbstoff in hoher Konzentration in etwa 24 Stunden bei intensiver Faßbewegung die Haut durchdringt und sich dort auch in reichlichem Maße ablagert. Bei diesem in Einbadgerbweise vorgenommenen Verfahren wird nur so viel Gerbstoff in konzentrierter Form angeboten, daß er nahezu vollständig aufgenommen wird. Hierbei erwärmt sich das Gerbsystem durch die heftige Walkbewegung bei nur geringer Flüssigkeitsmenge sehr leicht, was (sofern die Temperatur nicht über 40° C hinausgeht) für die Gerbgeschwindigkeit vorteilhaft ist.
Bei Bodenleder schließt sich an die eigentliche Gerbung eine *Nachgerbung* im Faß an. Sie hat zum Ziel, innerhalb von 2 bis 3 Stunden folgende Stoffe in das Leder einzuwalken: begrenzte Mengen Gerbstoff, um gewisse Eigenschaften des Leders zu modifizieren, Fixierungsmittel, die den ungebundenen Gerbstoff unauswaschbar machen, Bleichmittel, die die Lederfarbe aufhellen, und schließlich Öle, die eine gewisse Geschmeidigkeit herbeiführen.
2. Chromgerbung: Alle Oberleder werden heute durch Chromgerbung, die wichtigste Mineralgerbung, hergestellt. Sie erfordert als Vorbehandlung den *Pickelungsprozeß (Pickeln)*. Er besteht aus einer Behandlung mit Schwefel- und Ameisensäure bei gleichzeitiger Gegenwart von Kochsalz, weil andernfalls die Haut quellen würde. Die Säurebehandlung soll die noch vorhandene Alkalität der Haut beseitigen und das Leder in einen schwach sauren Zustand (pH 3,5 bis 4,5) versetzen. Bei der Chromgerbung sind nur die basischen Chromsalze gerbwirksam, und zwar um so mehr, je basischer sie sind. Damit zu Beginn der Gerbung möglichst milde Gerbbedingungen herrschen, muß die Basizität der Chromsalze durch die Säuerung der Häute teilweise neutralisiert werden. Die Gerbung mit den dreiwertigen Chromsalzen wird als Einbadgerbung in verschiedenen Reaktionsphasen durchgeführt. Häufig wird die Chrommenge in drei Teilen mit gewissem zeitlichem Abstand eingesetzt, wobei die Basizität der Teilmengen stufenweise von 33 % auf ungefähr 44 % erhöht wird. In der zweiten Phase der achtstündigen Chromgerbung, in der sich mit dem Rauherwerden des Leders eine stärkere Reibungswärme (bis zu 50° C) bemerkbar macht, wird die Chromlösung abgestumpft, d. h., es wird durch langsame Zugabe von Alkalien (z. B. Soda) die Basizität und damit die Gerbfähigkeit gesteigert. Neuerdings verwendet man auch sogenannte selbstabstumpfende Chromsalze, denen schwer zersetzbare Carbonate zugesetzt wurden, die die bei der Hydrolyse des Chrom-III-Salzes entstehende freie Säure langsam wegfangen. Eine Chromgerbung ist dann beendet, wenn die „Kochgare" erreicht ist, d. h., wenn ein in kochendes Wasser geworfenes Lederstück in der Fläche nur noch unbedeutend schrumpft. Chromleder müssen nach der Gerbung noch einige Tage in nassem Zustand lagern, bis die Bindung des Chroms und seine komplexen hydrolytischen Veränderungen zu einem stabilen Gleichgewicht gekommen sind. Im Laufe der Lagerung wird fortlaufend Säure abgespalten, die im nächsten Arbeitsgang neutralisiert wird. Zunächst wird das Leder jedoch mit der Bandmesserspaltmaschine (Abb. 1) gespalten, sofern dies nicht schon in der Wasserwerkstatt geschehen ist. Danach wird es gefalzt: Das *Falzen* geschieht mit einer Walzenmaschine, bei der die Messer einen scharfen Grat erhalten haben; der Vorgang hat die Egalisierung der Lederstärke zum Ziel und gestattet, die Lederstärke genauer als beim Spalten einzustellen. Die Neutralisation erfolgt im Faß mit wäßrigen Lösungen bestimmter Salze.

Leder

Lederart	Hautart	Bearbeitungsverfahren
Rindbox	Rindshäute	überwiegend Chromgerbung mit nur geringfügiger Nachgerbung
Rindvelour (Hunting)	Rindshautspalt	Chrom- oder Aluminiumgerbstoff; geschliffen
Boxcalf bzw. Mastbox	Kalbfelle oder Mastkalbfelle	rein chromgegerbt, anilingefärbt und glanzgestoßen am edelsten; häufig aber auch leicht geschliffen, abgedeckt, in „Stoßbügelzurichtung"
Velour	Kalbfelle, Schweine, Ziegen	Chrom- und Aluminiumgerbung; auf Fleischseite geschliffen
Nubukleder		wie Velour, nur auf der Narbenseite geschliffen
Chevreaux	Ziegenfelle u. Bastarde zw. Ziegen und Schafen	Chromgerbung (nach Zweibadverfahren) Anilinfärbung, Stoßzurichtung
Chevreauxlin (Chevreauximitation)	Schafe	Arbeitsweise ähnlich Chevreaux
Schrumpfleder	Rind, Kalb, Ziege, Schwein	Meist vegetabilisch oder synthet. mit Spezialgerbst. angegerbt; Ausgerbung mit Chrom, Plastikzurichtung
Futterleder	Schafe, Ziegen, Kälber minderer Qualität, Rindsspalte	Chrom oder veg. gegerbt, wenig gefettet, leicht gefärbt, etwas abgedeckt
Unterleder	Rindshäute	in veg. Gerbung, häufig mit Anteilen synthet. Gerbstoffe in moderner Brühen-Faßgerbung; nur für Reparatur- und Militärzwecke in Altgrubengerbung mit Eichenlohe hergestellt
Flexibelspalte	Rindsspalt	in moderner veg. synthet. Gerbung für den Boden von leichtem Schuhwerk hergestellt; besonders biegsam
Brandsohlleder	Seiten und Hälse von Rindshäuten	vegetabilisch mit Anteilen von synthet. Gerbstoffen
Deckbrandsohlen	Schafe	veg. oder chromgar; abgedeckt
Bekleidungsleder	Rindsnarbenspalte, Ziegen, Schafe, Bastarde	chromgegerbt, glatt als Narbenleder (abgedeckt) oder rauh als Velourleder zugerichtet
Glacéleder (Handschuhe)	Zickel- und Lammfelle	mit Alaun, Eigelb und Mehl, heute zusätzlich mit Chromgerbstoffen
Nappaleder (Handschuhe)	Ziegen und Schafe	in reiner Chromgerbung
Möbelvachetten (ähnlich f. Koffer)	Narbenspalte großflächiger Bullenhäute	veg. Gerbung, gelegentlich anteilig Chromgerbung mit sehr widerstandsfähiger Deckschicht
Taschen- oder Blankleder	Rindshäute, oft Seiten und Hälse	veg. Gerbung mit natürl., meist aber künstl. (gepreßtem) Narben
ASA-Leder (Arbeiterschutzartikel)	Rindsspalte	chromgar, rauh oder gedeckt, oft nicht gefärbt

METALLGIESSEN I (BLOCKGUSS)

Als Vorgang zwischen der schmelztechnischen Gewinnung der Metalle und ihrer Weiterverarbeitung steht das Gießen. Dieses erfolgt entweder zu großen Blöcken oder Formaten, die nachfolgend durch Schmieden, Walzen, Pressen oder dergleichen weiterbearbeitet werden oder zu handlichen, meistens stapelbaren Gießblöcken, Masseln oder Barren – vorwiegend bei NE-Metallen –, die noch einmal umgeschmolzen werden oder schließlich zu Werkstücken bestimmter Gestalt, die kleiner oder nur noch geringer Nachbearbeitung bedürfen. Die Gruppierung der wichtigsten Gießverfahren läßt sich aus dem folgenden Schema erkennen:



Die Auswahl der Verfahren ist abhängig von dem Schmelzpunkt und den Gießeigenschaften der Metalle oder Legierungen, bei Gußstücken außerdem von dem Verwendungszweck, den angestrebten mechanisch-technologischen Eigenschaften, der gewünschten Genauigkeit und Oberflächengüte, der Stückzahl, der Wirtschaftlichkeit und ähnlichen Gesichtspunkten.

Zum Gießen von Blöcken aus Stahl und NE-Metallen, die als Ausgangsprodukt für die weitere Verarbeitung dienen, werden normalerweise Formen, sogenannte Kokillen aus Gußeisen verwendet, in die das Metall direkt aus dem Ofen über eine Gießrinne oder mittels einer Gießpfanne fallend von oben oder mit einem langen Gießtrichter, der vor der Erstarrung herausgezogen wird oder aber über ein entsprechendes Eingußsystem steigend von unten hineingegeben wird. Bei dem Gießen im Gespann (Abb. 1) werden mehrere Formen über einen Eingußkanal gleichzeitig gefüllt. Beim Schwenkguß (Abb. 2) wird direkt aus der Gießpfanne in die Kokille gegossen, wobei diese aus nahezu waagerechter, langsam in senkrechte Stellung abgekippt, während die Pfanne entsprechend angehoben wird. Zur Erzielung eines Gusses mit möglichst gleichmäßiger Qualität und nicht zu grobem Erstarrungsgefüge, zur Vermeidung von Entmischungen (Seigerungen) und Erstarrungshohlräumen (Lunkern) werden die Kokillen im allgemeinen gekühlt durch Kühlwasserumläufe in der Formwand, Anspritzen mit Wasser, Absenken der Kokille während des Erstarrens in ein Wasserbecken oder ähnliche Verfahren. Das letztgenannte Prinzip wird bei dem für NE-Metalle eingesetzten Tauchguß angewendet, der Blöcke mit einem feinkörnigen, gleichmäßigen Gefüge liefert. Dabei wird eine dünnwandige Kokille von oben mit einer elektrisch beheizten Haube umschlossen, die mit einer Gießöffnung versehen ist. Nach dem Einfüllen des Metalls wird die Kokille langsam in ein Kühlwasserbecken abgesenkt. Ähnlich arbeitet das daraus entwickelte Mehrfachtauchgießverfahren (Abb. 3), bei dem sich mehrere Kokillen, jeweils umschlossen von einer beheizten Haube, in einer Gießgrube befinden. Das Metall wird über Verteilerrinnen und lange Trichter in die Kokillen gefüllt, die Trichter nach der Füllung herausgezogen und die Heizhauben langsam abgezogen, während gleichzeitig die Grube mit Kühlwasser gefüllt wird.

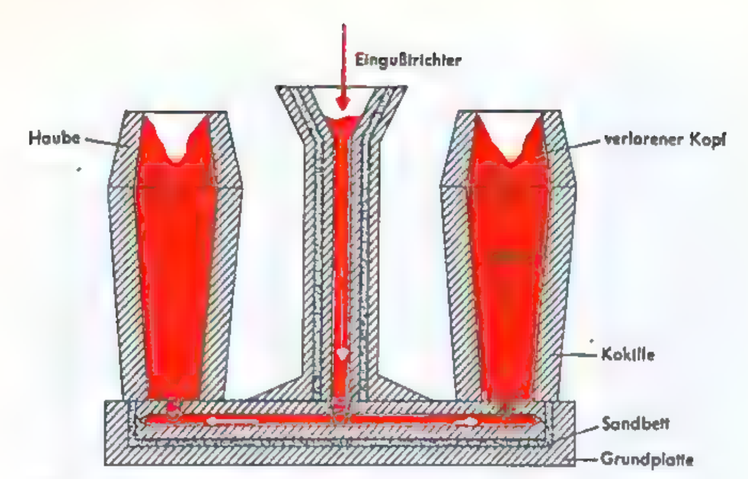


Abb. 1 Gießen im Gespann

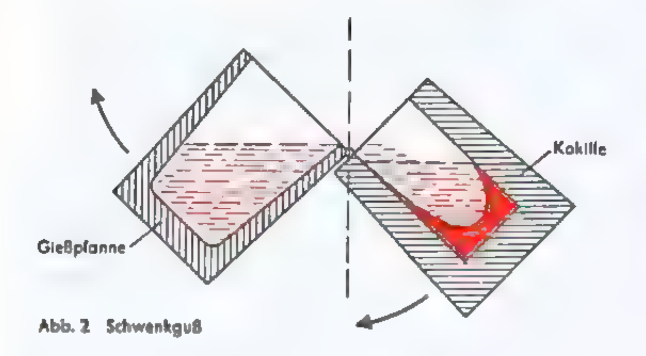


Abb. 2 Schwenkguß

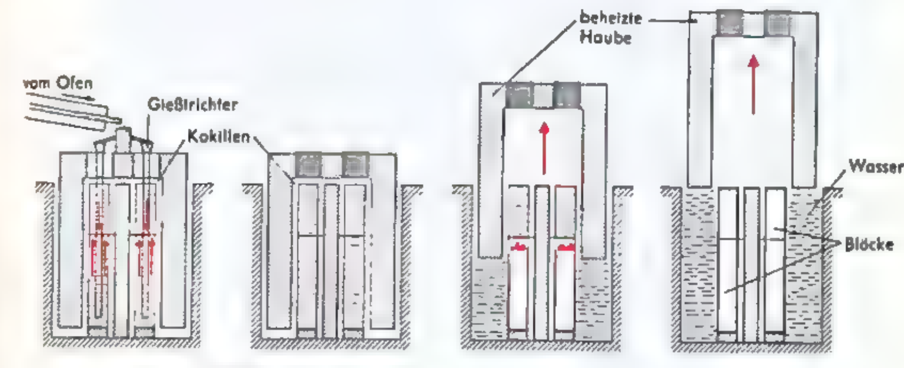


Abb. 3 Mehrfachtauchgießverfahren

METALLGIESSEN II (STRANGGUSS)

Vor über 100 Jahren wurde von Bessemer ein Vorschlag patentiert, der es ermöglichen sollte, Arbeitsgänge auf dem Weg vom flüssigen Metall zum Halbzeug zu übergehen. Der Stahl sollte zwischen zwei wassergekühlte, entsprechend profilierte Walzen gegossen und in Form einer festen Platte herausgezogen werden (Abb. 1). Seit dieser Zeit wurden immer wieder Vorschläge gemacht, die diese Grundidee aufgriffen, aber die technische Verwirklichung bereitete sehr große Schwierigkeiten, bis in den Jahren vor dem zweiten Weltkriege die ersten größeren Erfolge erzielt werden konnten und der Strangguß seitdem eine sehr schnelle Entwicklung nahm. Zunächst gelang das Stranggießen von Aluminium, welches aufgrund seines niedrigen Schmelzpunktes und seiner Gieß- und Erstarrungseigenschaften dabei die wenigsten Schwierigkeiten bereitete und die Herstellung von Blöcken, Rohren und Profilen aus diesem Metall und seinen Legierungen im Senkrechtstrangguß ist heute das dafür gebräuchlichste Verfahren. Das Prinzip dieses von S. Junghans entwickelten Verfahrens beruht darauf, daß das Metall in einer oben und unten offenen, niedrigen, wassergekühlten Kokille aus Kupfer oder Aluminium von rundem, quadratischem, rechteckigem oder anderem Querschnitt zu einem Strang geformt wird (Abb. 2, S. 167). Die Form ist bei Eröffnung des Gießprozesses zunächst unten durch einen absenkbaren Gießtisch abgeschlossen, so daß sich darin die Erstarrung einleiten und durch Absenkung des Gießtisches langsam der feste Metallstrang, der durch Berieselung gekühlt wird, herausziehen läßt. Der Strang wird nach Erreichung einer bestimmten Länge, die durch die Hubhöhe des Gießtisches gegeben ist, durch fliegende Sägen oder Schneidbrennvorrichtungen abgelängt und kann dann weiterverarbeitet werden. Durch den Strang haltende Förderrollen oberhalb der Trennvorrichtung kann das Gießen des Stranges kontinuierlich über einen beliebigen Zeitraum erfolgen (Abb. 3), wobei über entsprechende Schwimmervorrichtungen der Metallzufluß laufend geregelt wird. Die Temperatur und Zuflußmenge des Metalls, die Kokillentemperatur, der Kühlwasserzufluß und die Absenkgeschwindigkeit des Stranges müssen genau aufeinander abgestimmt sein. Durch Anordnung mehrerer Kokillen nebeneinander können in einer Anlage mehrere Stränge gleichzeitig gegossen werden. Rohre und andere Hohlprofile lassen sich ebenfalls im Strangguß herstellen, indem von oben in die Kokille ein entsprechend geformter, wassergekühlter Kern eingebaut wird.

Aus dem Senkrechtstrangguß wurden verschiedene Verfahren für den Waagerechtstrangguß entwickelt, bei denen die Kokille seitlich an dem Warmhalteofen angeordnet ist und der Strang mit Förderrollen horizontal herausgezogen wird (Abb. 4). Dem Aluminiumstrangguß folgte die Entwicklung der Verfahren für Kupfer und seine Legierungen, wobei das für Leichtmetall gebräuchliche Gießverfahren erheblicher Abwandlungen bedurfte. Es wird hierbei mit im unteren Teil gekühlten Graphitkokillen und unter Schutzgas gearbeitet.

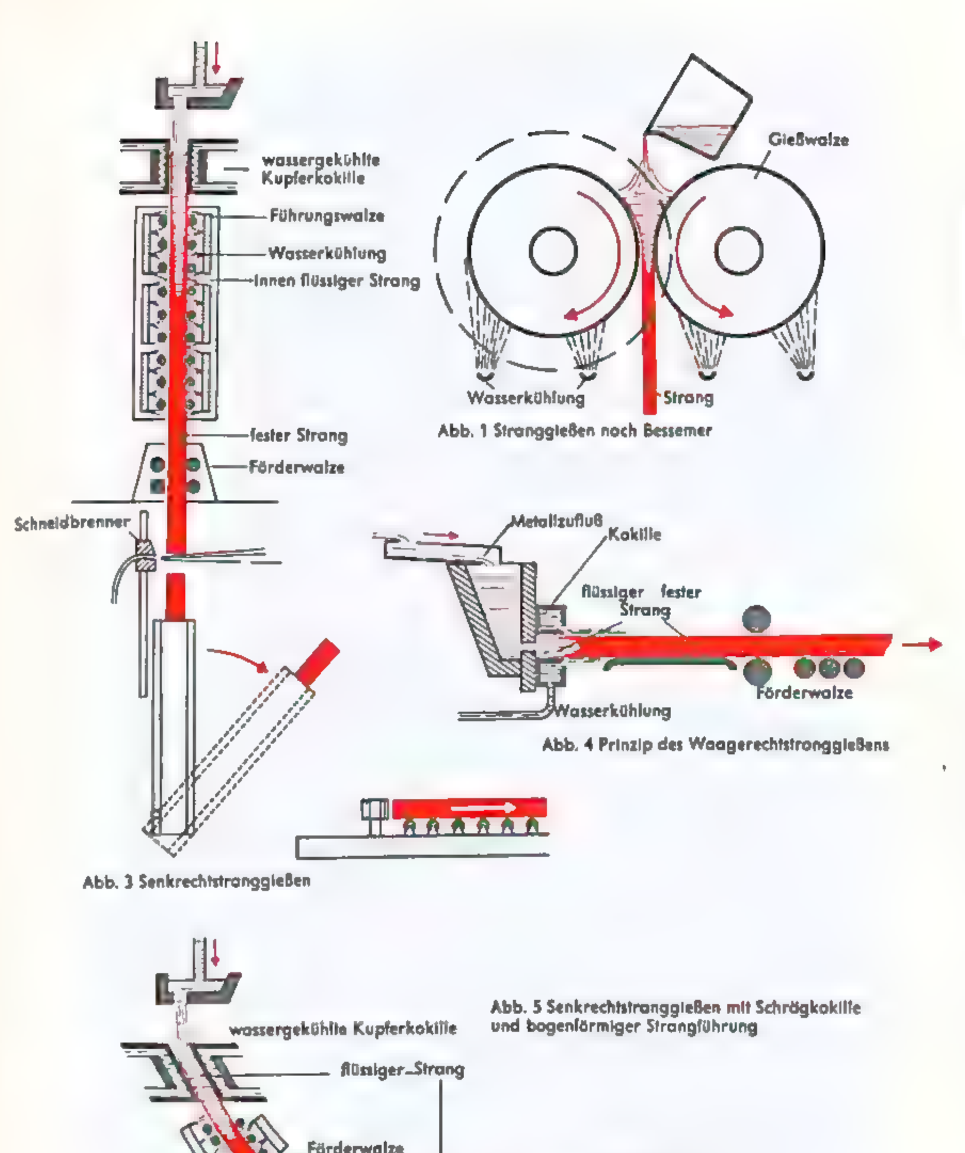


Abb. 1 Stranggießen nach Bessemer

Abb. 4 Prinzip des Waagerechtstranggießens

Abb. 3 Senkrechtstranggießen

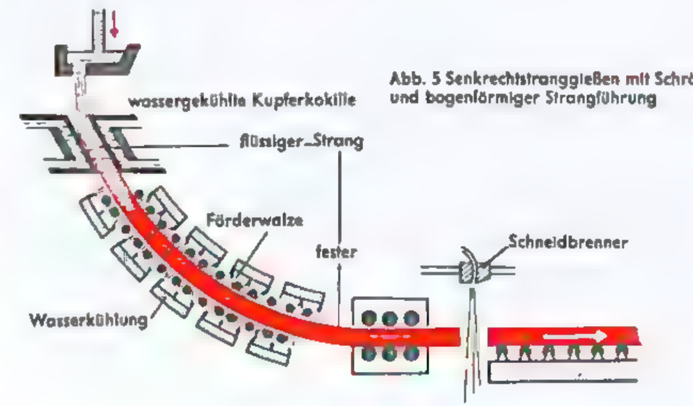


Abb. 5 Senkrechtstranggießen mit Schrägkokille und bogenförmiger Strangführung

METALLGIESSEN III (STRANGGUSS)

Während die Verfahren für Aluminium und Kupfer bereits einen hohen technischen Stand erreicht haben, befinden sich diejenigen für Stahl und Gußeisen noch in voller Entwicklung. Die dabei zu bewältigenden großen Schwierigkeiten liegen vor allem darin, daß das Eisen aufgrund seiner schmelztechnischen Gewinnung stoßweise und in großer Menge anfällt und relativ schnell vergossen werden muß. Hinzu kommt der hohe Wärmeinhalt des Eisens bei gleichzeitig schlechter Wärmeleitfähigkeit, was für die Konstruktion einer Stranggußvorrichtung ein Problem darstellt, wie überhaupt die hohen Arbeitstemperaturen apparative Schwierigkeiten mit sich bringen. Ein Teil dieser Probleme wurde überwunden und verschiedene Stranggußanlagen arbeiten bereits in einem industriellen Umfang. Das Gießen erfolgt hierbei in eine wassergekühlte Kupferkokille größerer Bauhöhe, die eine sehr schnelle und kurze, periodische Auf- und Abwärtsbewegung durchführt, wodurch der Wärmeentzug begünstigt und ein Hängenbleiben des Stranges sowie ein Reißen der äußeren Metallschale, was ein Ausfließen des Stahls aus dem Kern hervorrufen würde, verhindert wird. Da der Stahlstrang über einen längeren Zeitraum im Inneren flüssig ist, ist die benötigte Bauhöhe für eine derartige Anlage im allgemeinen noch höher als für Leichtmetall, was dazu führte, Anlagen zu entwickeln, bei denen der im Senkrechtguß hergestellte Strang in einen Bogen geleitet und horizontal in die Förderwalzen hineingeführt wird. Dieser Vorgang erfolgt entweder kurz nach Austritt aus dem Bereich der Wasserkühlung mittels einer schweren Umlenkwalze, kann aber auch durch bogenförmige Anordnung der Führungsrollen und zusätzlich durch eine schräge, in einen Bogen hineinleitende Konstruktion der Kokillen erreicht werden (Abb. 5, S. 165). Für Gußeisen wurden einige Anlagen zum Stranggießen von Muffenrohren entwickelt, jedoch ist das gebräuchlichste Verfahren hierfür noch der Schleuderguß (s. S. 174).

Neben den besprochenen Verfahren, die mit feststehenden, sogenannten Gleitkokillen arbeiten, bei denen der Strang an der Formwand entlanggleitet, wurden auch verschiedene Gießmaschinen für Bänder, Stangen, Drähte und andere Profile geringen Querschnitts konstruiert, bei denen die Kokille als sogenannte Wanderkokille bis zur völligen Erstarrung des Stranges mitläuft. Dabei werden entweder rotierende, mit einer Rille versehene, nach oben mit einem Metallband abgeschlossene, gekühlte Räder oder Walzen zur Gießformung verwendet (Rotary-Verfahren, Abb. 7) oder Raupenkokillen, die aus zwei mit Kokillenhälften belegten umlaufenden Bändern bestehen, die sich im Bereich des Eingusses des flüssigen Metalls zu einer Kokille zusammenschließen und mit dem Strang mitlaufen, bis dieser die Maschine im völlig festen Zustand verläßt (Hazelett-Verfahren, Abb. 6). Durch den Gießmaschinen nachgeschaltete Walz- oder Ziehvorrichtungen lassen sich in kontinuierlicher Weise Bänder oder Drähte herstellen und durch Hinzuschaltung noch weiterer Verformungsverfahren, beispielsweise Stanz- und Tiefziehvorrichtungen, die Herstellung von Blecherzeugnissen am laufenden Band ermöglichen.

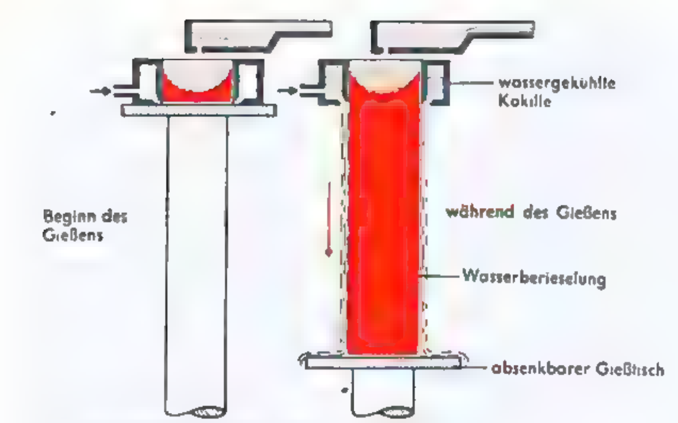


Abb. 2 Halbkontinuierliches Stranggießen von Aluminium

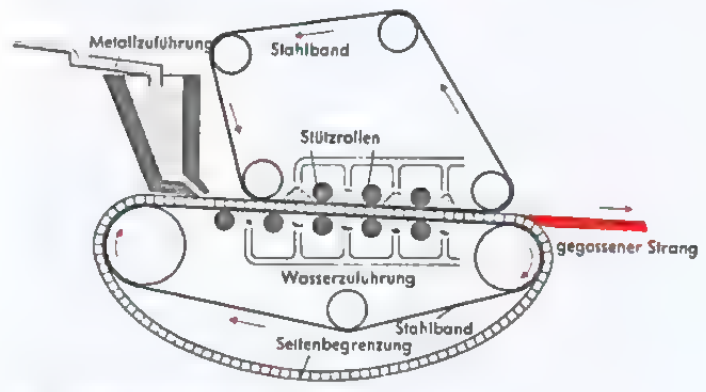


Abb. 6 Gießen nach dem Hazelett-Verfahren

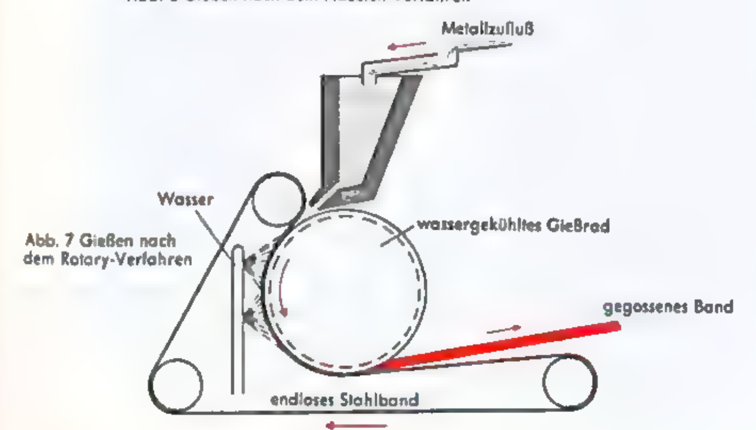


Abb. 7 Gießen nach dem Rotary-Verfahren

METALLGIESSEN IV (FORMMASKENVERFAHREN)

Die vielfachen Verfahren für das Gießen von Metallen zu kleinen und großen Werkstücken einfacher bis kompliziertester Gestalt lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: in den Guß mit verlorenen Formen, die nach dem Gießen zerstört werden und in den mit Dauerformen, die zahlreiche Abgüsse ermöglichen (Kokillenguß, Druckguß u.a.). Beide Verfahren benötigen zunächst ein Modell des Werkstückes, von dem die verlorene Gießform abgenommen bzw. die metallische nachgebildet wird. Die Modelle aus Holz, Metall, Gips, Kunststoff sind, soweit es sich nicht um sehr einfach gestaltete Formen handelt, im allgemeinen aus mehreren Teilen zusammengesetzt: dem eigentlichen Modell und den Kernen, die die Hohlräume und Aussparungen des Gußstückes bilden. Bei dem Gießen mit verlorenen Formen werden zunächst die einzelnen Modellteile manuell oder maschinell abgeformt und dann zu der Form zusammengesetzt. Die Formstoffe bestehen vorwiegend aus mineralischen Materialien wie Sand, Zement, Schamotte, Gips u.a., die die Grundmasse bilden und aus Bindemitteln (Sulfitlauge, Öl, Wasserglas, Kunstharz u.a.), die der Form durch Trocknung oder durch chemische Verfestigungsvorgänge die für den Guß erforderliche Festigkeit und Maßhaltigkeit verleihen. Bei dem Trockenguß werden die Formen vor dem Gießen gebrannt, bei dem Naßguß wird das Metall in die feuchte Form gegeben. Das Gießen erfolgt bei dem offenen Guß von oben, bei dem geschlossenen Guß, der am gebräuchlichsten ist, durch ein dafür vorgesehenes Eingußsystem, wobei das Metall meistens steigend von unten nach oben in die Form einfließt. Nach dem Erstarren wird das Gußstück aus der Form gelöst, Eingüsse und Überläufe abgetrennt und, soweit notwendig, nachbearbeitet.

Die verschiedenen Sandgußverfahren und die daraus abgeleiteten Spezialverfahren, von denen nur einige aufgeführt werden können, haben ihre Benennung nach der Art des Gußmaterials, des Formenwerkstoffes, der Formenherstellung oder der Einformung des Modells (Kasten-, Gruben-, Herd-, Schablonenformverfahren), des Gießverfahrens oder nach dem Namen ihrer Erfinders. Das gebräuchlichste Verfahren für die Sandgußherstellung nicht zu großer Gußstücke ist das Kastenformverfahren (Abb. 1), bei dem das Modell in einem meist zweiteiligen Kasten in den Formstoff eingebettet wird, den man durch Pressen, Rütteln oder Stauchen verdichtet. Danach wird der Kasten geöffnet, das Modell herausgenommen, die Kerne eingelegt, der Kasten wieder geschlossen und der Guß durchgeführt. Zum Gießen sehr großer, komplizierter und schwerer Stücke dient das Grubenformverfahren, bei dem die Form in einer Gießgrube aufgebaut wird (z. B. beim Glockenguß). Da die Festigkeit des Sandes für große Teile häufig nicht ausreicht, wird diese bei dem Zementsandformverfahren durch Zementzusatz verbessert. Teilweise arbeitet man auch mit Kombinationen von Teilen aus Zementsand und Sand. Formen zum Gießen einfacher, flacher Gußstücke können in einen muldenförmigen Herd eingeformt werden, wobei das Gießen beim geschlossenen Herdguß mit, beim offenen ohne Abdeckung des Formenhohlraumes erfolgt. Entsprechend symmetrisch geformte Teile lassen sich durch Ziehen einer Schablone entlang einer Führungsachse, Drehen um eine Achse oder durch andere Schablonierungsvorgänge in den Formenwerkstoff einarbeiten (Schablonenformverfahren, Abb. 2).

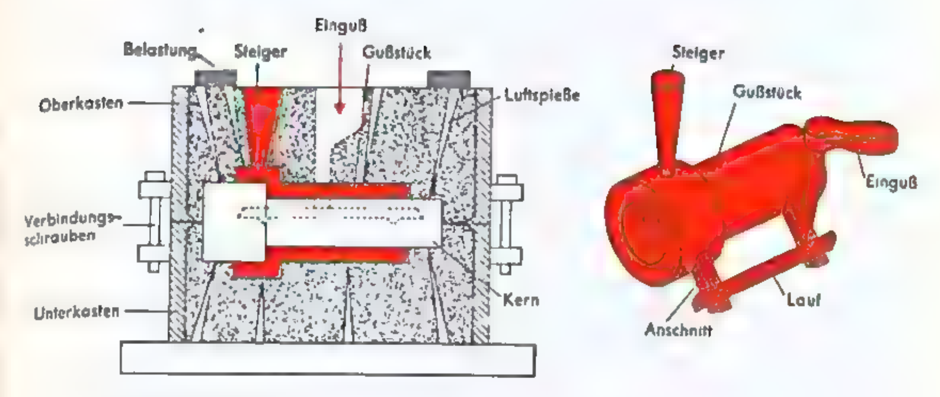
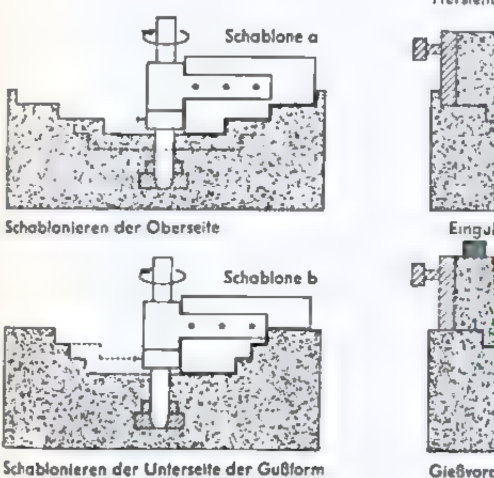
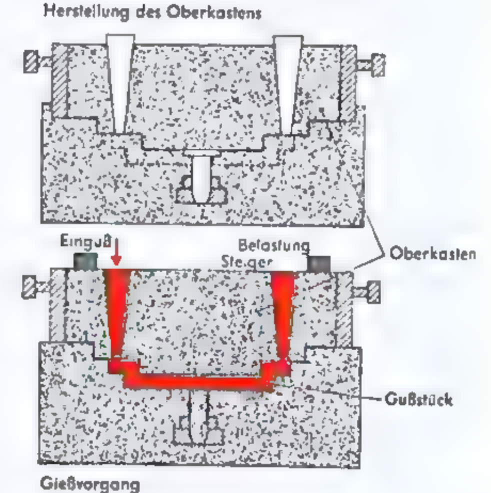


Abb. 1 Kastenformverfahren



Schablonieren der Oberseite

Schablonieren der Unterseite der Gußform



Gießvorgang

Abb. 2 Schablonenformverfahren

METALLGIESSEN V (DRUCKGUSS)

Die Druckgußverfahren ermöglichen die wirtschaftlichste und schnellste Herstellung größerer Stückzahlen von Metallgußteilen mit komplizierter Gestalt oder mit vielen Bohrungen, Aussparungen und Gewinden und zwar mit größter Maßgenauigkeit und Oberflächengüte, geringem Werkstoffverbrauch und ohne oder nur mit geringfügiger Nachbearbeitung. Sie bieten dadurch den kürzesten Weg vom Ausgangsmaterial bis zum Fertigprodukt.

Die Verfahren basieren darauf, daß die Metalle im flüssigen Zustand unter Druck in eine Form gepreßt werden, die nach Art einer hydraulischen Presse gebaut ist, um die hohe Kraft zum Schließen der Form aufzubringen. Die Druckgießmaschinen lassen sich in zwei Systeme unterteilen: Warmkammermaschinen, die für niedrig schmelzende, und Kaltkammermaschinen, die für höher schmelzende Metalle und Legierungen Verwendung finden. Bei den Warmkammermaschinen (Abb. 1) wird das Metall in einem innerhalb der Maschine befindlichen Tiegel flüssig gehalten, und der Druckbehälter (Kammer) für die Metallzuführung liegt in dem Metallbad. Von den nach diesem System arbeitenden Kolben- und Druckluftgießmaschinen sind die erstgenannten am gebräuchlichsten. Bei den Kaltkammermaschinen wird das Metall mit einer Schöpfkelle oder mit automatischen Vorrichtungen aus einem nebenstehenden Warmhalteofen entnommen, in die außerhalb oder innerhalb der Form befindliche Druckkammer gegeben und mit einem Kolben in die Form gepreßt, wobei je nach Anordnung der Kolben Maschinen mit horizontalem (Abb. 3) oder vertikalem (Abb. 2) Druckgießaggregat zu unterscheiden sind. Im einfachsten Fall werden die Maschinen von Hand betrieben. Am gebräuchlichsten sind aber vollautomatische Anlagen, mit denen hohe Schußzahlen möglich sind. Ein „Schuß" umfaßt einen Gießvorgang mit Schließen der Form, Eindrücken des Metalls, Ziehen der Kerne, Öffnen der Form, Auswerfen der Gußstücke und eventuell Abscheren des Eingusses, Entgraten und Reinigen der Form. Die Anzahl der Schüsse in einer Stunde ist abhängig von Form und Größe der Stücke und von dem Metall. So lassen sich aus Zinklegierungen in derselben Zeit rund siebenmal soviel Teile herstellen wie aus Messing, und es gibt vollautomatische Maschinen, die beim Gießen kleiner Gußteile aus Zinklegierungen mehr als 1500 Schuß in der Stunde ermöglichen. Die teilweise sehr kompliziert gestalteten, präzis gearbeiteten und daher sehr teuren, vielteiligen Druckgußformen, die durch die hohen Drücke und zahlreichen Temperaturwechsel sehr stark beansprucht sind, werden für Zink und seine Legierungen teilweise aus unlegiertem Stahl, meistens aber auch, wie für Aluminium, Magnesium, Kupfer und Legierungen dieser Metalle aus Warmarbeitsstählen gefertigt, die eine längere Haltbarkeit gewährleisten.

In jüngerer Zeit entwickelt wurde der Vakuumdruckguß, der bisher vorwiegend in den USA, in England und Holland technische Anwendung findet und besonders dichte, porenfreie Druckgußteile mit noch besserer Oberfläche liefert, die sich leichter galvanisch behandeln lassen oder auch einer Glühbehandlung widerstehen. Dabei gibt es zwei Systeme: Entweder wird die Form nach dem Schließen mit einer Haube umgeben und dann evakuiert, oder der Warmhalteofen ist unter der Gießmaschine so angeordnet, daß das Metall durch Evakuierung der Form in diese hineingesogen und darin verdichtet wird. Ein auf dem letztgenannten Verfahren basierendes Prinzip soll die Druckgußverarbeitung von Gußeisen ermöglichen.

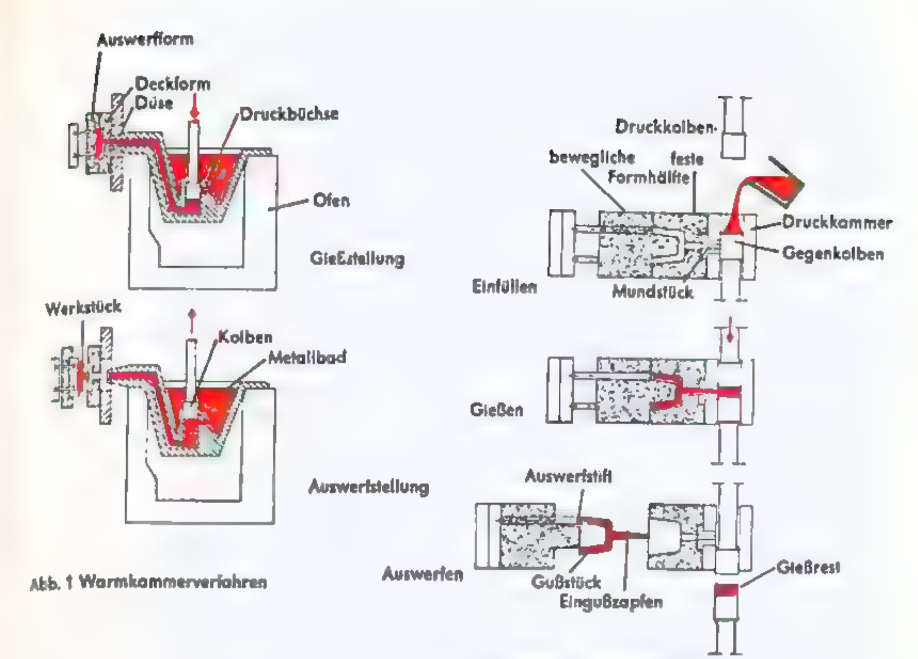


Abb. 1 Warmkammerverfahren

Abb. 2 Vertikale Kaltkammermaschine

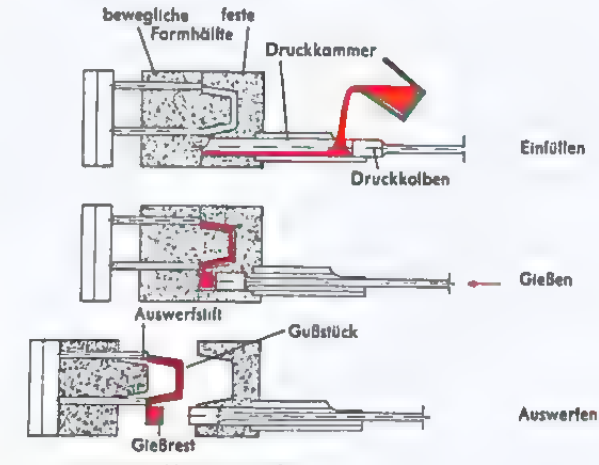


Abb. 3 Horizontale Kaltkammermaschine

METALLGIESSEN VI (KOKILLENGUSS)

Während bei dem Sandguß (S. 168) die Form nach jedem Guß zerstört wird, lassen sich bei dem Gießen in Dauerformen, sogenannte Kokillen, zahlreiche Abgüsse mit immer derselben Form erzielen. Die ältesten, aus der Frühzeit überlieferten Gießformen sind aus Stein und wurden für die Herstellung von Äxten, Werkzeugen und anderen einfachen Geräten verwendet. Einen Übergang zwischen Sand- und Kokillenguß bilden einfach gestaltete Formen aus Schamotte oder Gips, die mehrere Abgusse ermöglichen. Den verbreitetsten Einsatz finden Kokillen aus Stahl, Gußeisen oder warmfesten, legierten Eisenwerkstoffen. Daneben verwendet man auch Kokillen aus Kupfer und Aluminium und für das Gießen von Stahl, Gußeisen und Uran solche aus Graphit. Die Kokillen liefern Gußstücke mit glatter, sauberer Oberfläche und verhältnismäßig großer Maßgenauigkeit. Die Lebensdauer einer Kokille, vielmehr die damit erreichbare Stückzahl ist im wesentlichen abhängig von der Temperaturwechselfestigkeit des Kokillenmaterials, dem Gießwerkstoff und der Temperatur, bei der er vergossen wird und schließlich auch von dem Gießverfahren.
Bei dem Entwurf des Modells des Gußstückes, nach dem die Form gebaut wird und ebenso bei der Konstruktion der Kokille sind zahlreiche Besonderheiten zu berücksichtigen. So ist für die Formgebung des Eingußsystems und der Steiger zu beachten, daß die Formwände eine starke Abschreckwirkung auf das flüssige Metall ausüben und dieses sehr viel schneller erstarrt als beim Sandguß. Außerdem muß die bei Sand natürlich gegebene Gasdurchlässigkeit, die das Entweichen der verdrängten Luft ermöglicht, bei den Kokillen durch feine Kanäle in den Teilungsfugen und durch Entlüftungsbohrungen erreicht werden. Schließlich muß die bei der Erstarrung und Abkühlung des Metalls auftretende Schwindung berücksichtigt werden und die Form so konstruiert sein, daß diese nicht behindert wird und sich das Werkstück nach dem Guß leicht herauslösen läßt. Besondere Schwierigkeiten bereitet die Schwindung bei der Konstruktion der die Hohlräume und Aussparungen des Gußstückes bildenden Kerne, die normalerweise aus Stahl oder Speziallegierungen bestehen und teilweise durch kompressible Sand- oder Maskenformkerne ersetzt werden.
Um ein Verschweißen der zu vergießenden Metalle mit der Kokille zu verhindern, und das Herauslösen des Gußstückes zu erleichtern, wird die Form häufig mit Schlichten – das sind wäßrige Aufschlämmungen von Ton, Kreide, Knochenasche mit Wasserglas als Bindemittel – versehen, die durch Anstreichen, Anspritzen oder Eintauchen der Kokille in die Schlichte aufgebracht werden.
Das Gießen erfolgt beim Kokillenguß nur in besonders einfachen Fällen in die nach oben offene Kokille (Abb. 3). Meistens jedoch werden die teilweise sehr kompliziert gestalteten zwei- bis mehrteiligen (Abb. 1), oft mit mehreren Kernen versehenen, geschlossenen Kokillen über ein spezielles Eingußsystem gefüllt, welches so gestaltet sein muß, daß das flüssige Metall schnell, wirbelfrei und ohne Schaumbildung in die Form fließt. Bei Metallen mit niedrigem Schmelzpunkt muß die Form eventuell vor dem Guß erwärmt, bei solchen mit hohem Schmelzpunkt nach jedem Guß gekühlt werden. Neben dem Standguß wird insbesondere bei Schwermetallkokillenguß oder auch bei dem Sandguß von Leichtmetallen, wenn Metall- oder Werkstückform ein besonders gleichmäßiges Einfließen der Schmelze erfordern, das Schwenkgießverfahren angewendet (Abb. 2), bei dem die Form während des Gusses langsam gekippt wird. Bei dem für Kunstguß Anwendung findenden Sturzguß wird die Form nach der Füllung und Erstarrung des Metalls an den Formwänden gekippt, wodurch das noch flüssige Metall wieder ausfließt und ein Hohlkörper entsteht. In Sonderfällen findet für schwierig gestaltete oder besonders dünnwandige Teile der Unterdruck- oder Vakuumkokillenguß Anwendung, bei dem die Formfüllung durch Absaugung der Luft erleichtert wird.

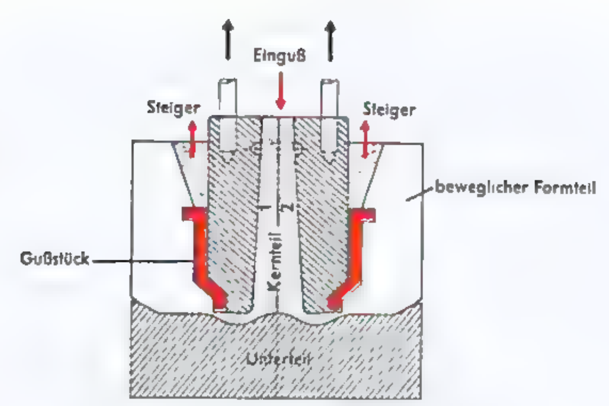


Abb. 1 Kokillenguß mit mehrteiliger Kokille

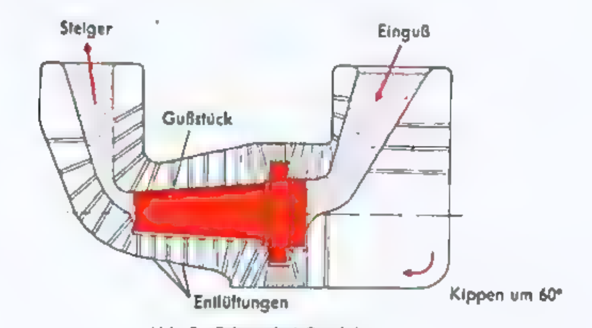


Abb. 2 Schwenkgießverfahren

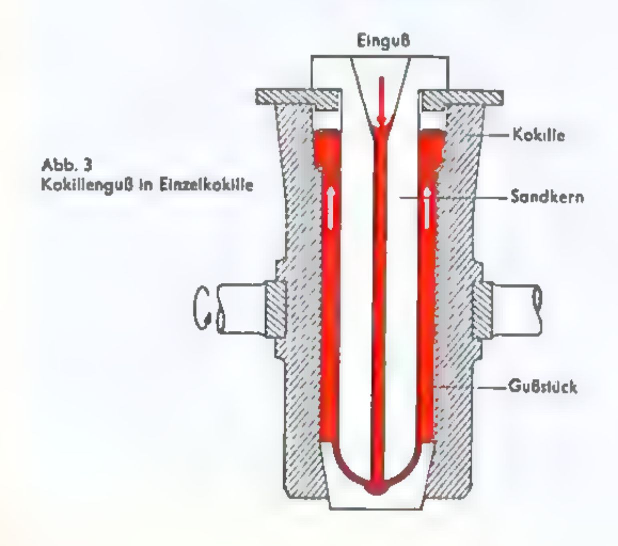


Abb. 3
Kokillenguß in Einzelkokille

METALLGIESSEN VII (SCHLEUDERGUSS)

Unter dem Begriff Schleuderguß sind alle Arten von Gießverfahren zusammengefaßt, bei denen durch Rotation eines Teiles der Gießeinrichtung die Zentrifugalkraft Einfluß auf die Formgestaltung, die Formfüllung und die Kristallisation nimmt. Im wesentlichen sind der Schleuderformguß (Abb. 1) und der Schleuderguß zu unterscheiden. Bei ersterem rotiert die Kokille während des Gießvorganges um ihre eigene Achse, wodurch die Formfüllung begünstigt und eine genaue Gußtoleranz erzielt wird und sich außerdem ein besonders feines, dichtes Gefüge mit sehr guten Festigkeitseigenschaften ausbildet. Das Verfahren findet Anwendung zum Guß schwer zu vergießender, hochlegierter Metalle und für Teile, an die besondere Güteanforderungen gestellt werden wie beispielsweise Eisenbahnräder, Zahnräder, Zylinderlauf-, Kolbenlauf- und Ventilsitzbüchsen und Rippenzylinder. Bei dem Schleuderguß wird die Zentrifugalkraft eines mit hoher Umdrehungsgeschwindigkeit um seine Achse rotierenden Systems benutzt, welches zur Herstellung zylinderförmiger Hohlkörper aus flüssigem Metall, das unter Einwirkung der Fliehkraft an den Formwänden erstarrt, dient. Die Umdrehungsgeschwindigkeit muß so groß sein, daß die Schwerkraft aufgehoben wird. Während die äußere Form des Hohlzylinders der Innenwand der rotierenden Form entspricht, kann seine Stärke oder sein Innendurchmesser durch entsprechende Dosierung der Metallmenge variiert werden. Die Drehachse kann senkrecht, geneigt oder waagerecht sein. Der Senkrechtschleuderguß dient vorwiegend zur Herstellung von Buchsen und anderen Formkörpern, deren Länge geringer ist als ihr Durchmesser.

Hauptanwendungsgebiet für den Waagerechtschleuderguß ist das Gießen von Rohren, insbesondere gußeisernen Druckrohren; er bietet dabei ein wirtschaftliches und weitgehend mechanisierbares Verfahren. Im wesentlichen kommen zwei Verfahren zum Einsatz: das Schleudern mit wassergekühlter Kokille nach Briede-de Lavaud (Abb. 2) und das in Sandform nach Moore (Abb. 3). Für die Herstellung von Muffenrohren setzt man am Ende der Schleuderform einen Sandkern ein, der beim Herausziehen des Rohres zerstört wird. Das erstgenannte Verfahren arbeitet mit einer wassergekühlten, etwas schrägliegenden Stahlkokille, die in Längsrichtung verfahrbar ist. Das Eingießen erfolgt über eine weit in die Form hineinragende lange Rinne aus einer kippbaren Zuteilungspfanne, die eine dem Rohrgewicht entsprechende Eisenmenge enthält. Nach Erreichen einer bestimmten Drehzahl fließt das Eisen in die Form, die langsam über die Rinne ausgefahren wird. Das flüssige Eisen bildet ein spiralförmiges Eisenband, das durch die Fliehkraft an der Innenwand der Schleuderform angelagert wird. Das Moore-Verfahren arbeitet mit festangeordneter Drehkokille, die mit einer mindestens 100 mm dicken Sandschicht ausgekleidet ist. Der Sand wird durch Schleudern eingebracht und verdichtet. Die Eingußrinne ist hier kurz, da die Erstarrung bei Sandguß relativ lange dauert und die Formfüllung dadurch gewährleistet ist. Das Verfahren hat den Vorteil, daß sich ein großer Kokillenpark erübrigt, da jeder beliebige äußere Rohrdurchmesser durch Änderung der Stärke der Sandauskleidung hergestellt werden kann.

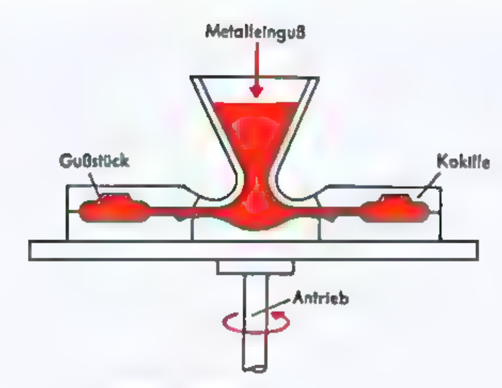


Abb. 1 Schleuderformguß

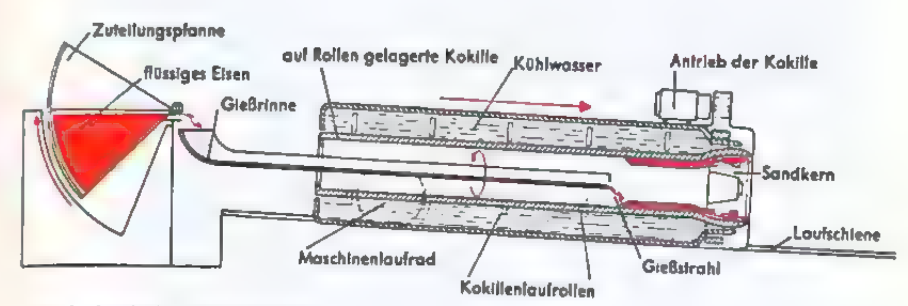


Abb. 2 Briede-de Lavaud-Verfahren

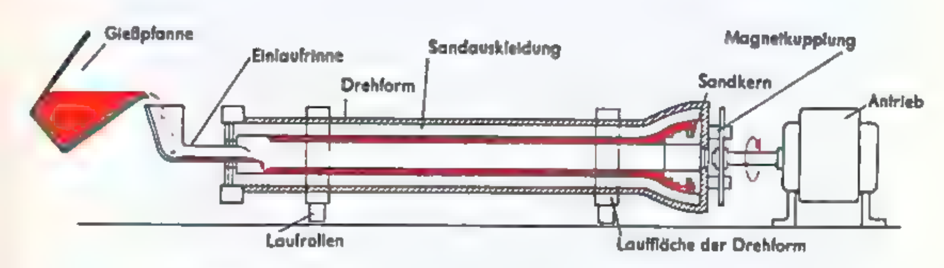


Abb. 3 Moore-Verfahren

SCHMIEDEN I

Zu den wesentlichsten Eigenschaften der Metalle gehört ihre Verformbarkeit, die ihre Formung durch Schmieden, Walzen, Pressen oder andere Verfahren ermöglicht. Die Verformung erfolgt dabei durch Druck- und Zugbeanspruchungen (oder beide Beanspruchungen kombiniert), infolge Gleitungen und Schiebungen in den Kristalliten und Zertrümmerung der großen zu kleineren Kristallen, ohne daß der Zusammenhang des Werkstoffes aufgelöst wird. Zu unterscheiden ist zwischen der Warmformung, die oberhalb einer für jeden Werkstoff bestimmten Temperatur erfolgt, wobei sich unter dem Einfluß der Wärme laufend ein neues, entspanntes, weiter verformbares Gefuge ausbildet und der Kaltformung, die im allgemeinen bei Raumtemperatur vorgenommen wird und zu einer Verfestigung des Werkstoffes und Erschöpfung der Verformbarkeit führt.

Zu den wichtigsten Warmverformungsverfahren gehört das Schmieden, das der Herstellung von Werkstücken der vielfältigsten Formen vom kleinsten Teil bis zu mehreren Tonnen schweren Kurbelwellen dient. Das im Schmiedefeuer, im Schmiedeofen oder durch Induktion auf die erforderliche Schmiedetemperatur vorgewärmte Halbzeug wird beim Schmieden durch Stauchung zwischen Schlag- und Preßflächen verformt, wobei das Material des Schmiedeteils in die Richtung des geringsten Fließwiderstandes abfließt, so daß beispielsweise beim Reckschmieden durch nebeneinandergesetzte Stauchungen eine Längung des Schmiedestückes erzielt wird. Die wichtigsten schmiedbaren Werkstoffe sind Stahl- und Stahllegierungen, daneben werden aber auch NE-Metalle und ihre Legierungen (z. B. Knetlegierungen) durch Schmieden geformt, wenn nicht andere Verfahren wirtschaftlicher sind.

Handschmiedewerkzeuge (Abb. 1) sind verschiedenartige Hämmer, wie der mit einer Hand geführte Handhammer (1–2 kp), der mit beiden Händen zu bedienende Vor- oder Zuschlaghammer (5–10 kp), weiterhin der Schlichthammer, der Kreuzschlaghammer, der Schrotmeißel und verschiedene Hilfshämmer. Schmiedeunterlage ist der 100–400 kp schwere Amboß mit der als Arbeitsfläche dienenden gehärteten Amboßbahn, die ein- oder beidseitig in ein kegelförmiges Horn ausläuft, welches die Durchführung der Biegearbeiten ermöglicht. Die Löcher im Amboß nehmen verschiedene Zusatzteile auf. Zum Halten der Schmiedestücke stehen Zangen und Kranzangen mit den verschiedensten Maulformen zur Verfügung und für größere Stücke bestimmte Halte- und Transporteinrichtungen.

Für das teilmechanisierte Schmieden kleiner bis mittlerer Werkstücke werden Schmiedehämmer unterschiedlichster Antriebsart eingesetzt, die wie die Handhämmer die Energie eines fallenden Gewichtes (Bär) zur Schmiedeformung ausnutzen. Für größere Teile finden Schmiedepressen, die mit Dampf, Druckluft, hydraulisch oder elektrohydraulisch betrieben werden und auch Schmiedemaschinen, die weitgehend automatisch arbeiten, Verwendung. Zur Herstellung von verwickelten Rohlingen aus Stangenmaterial sind bei sehr großen Stückzahlen auch Schmiedewalzen (Abb. 5, S. 179) gebräuchlich, deren Walzenpaare mit periodischem Kaliber im Gegensatz zu den gebräuchlichen Walzwerken jeweils nur eine Umdrehung vornehmen. Die Gesenke (Kaliber) reichen höchstens über den halben Walzenumfang.

Die Schmiedearbeiten lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: das Freiformschmieden und das Gesenkschmieden. Beim Freiformschmieden (Abb. 2) wird dem Metall durch gezielte Stauchungen mit einfachen, nicht die Werkstückform enthaltenden Werkzeugen die angestrebte Form gegeben.

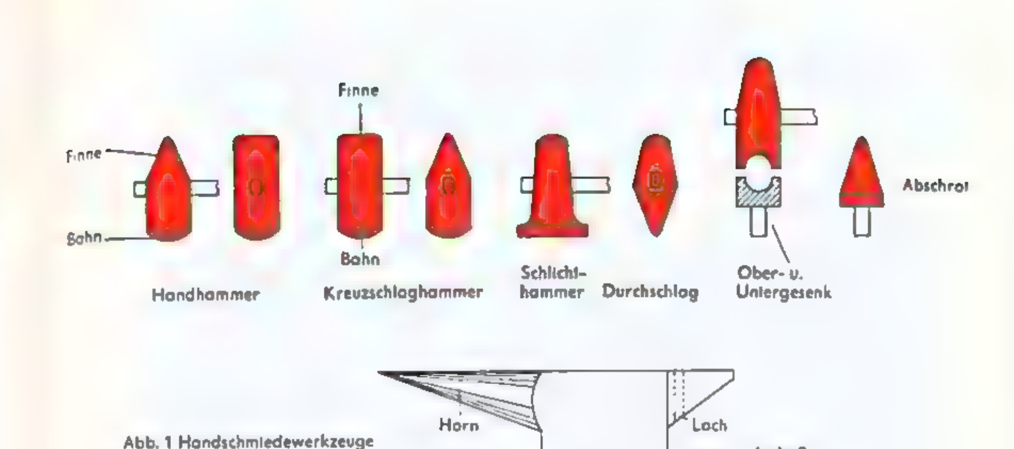
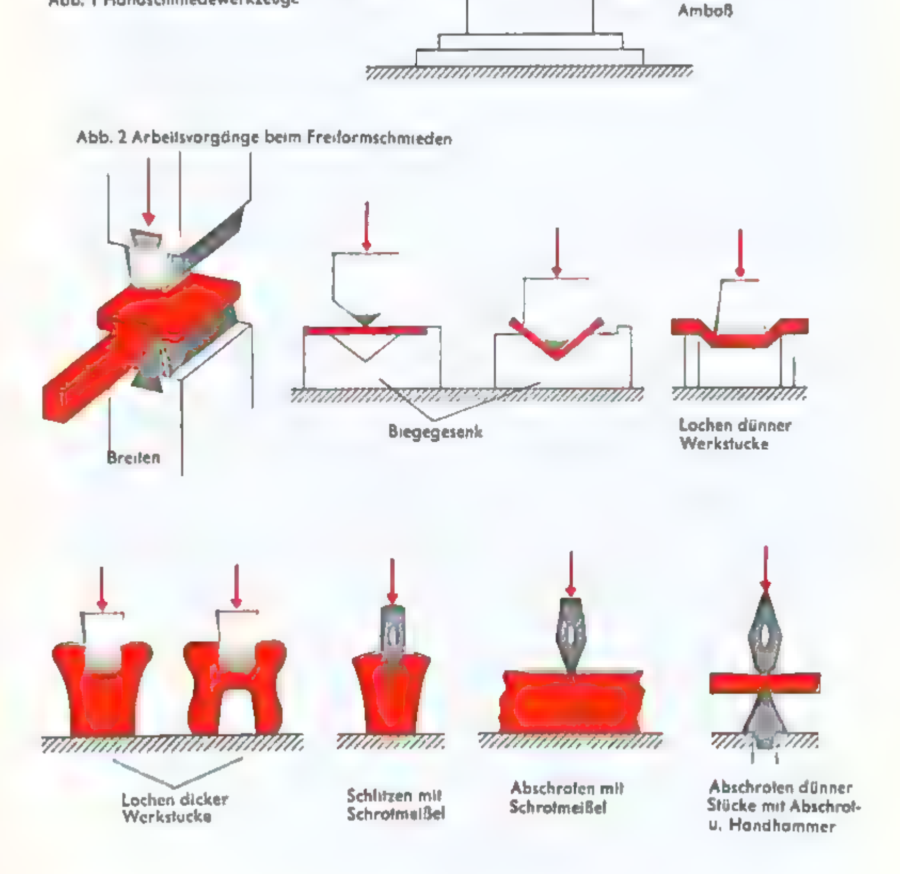


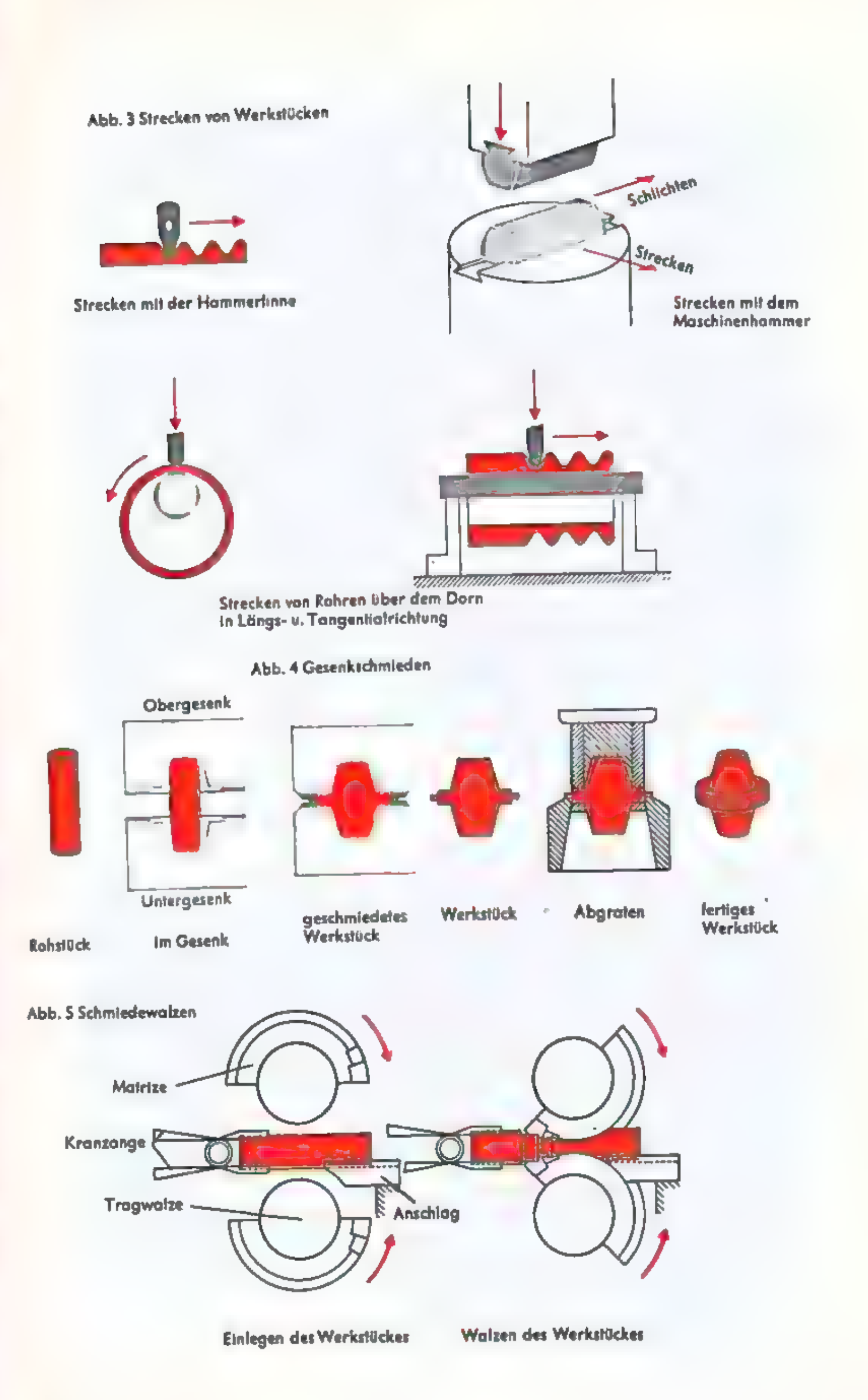
Abb. 1 Handschmiedewerkzeuge

Abb. 2 Arbeitsvorgänge beim Freiformschmieden



SCHMIEDEN II

Eine der Grundformen des Freiformschmiedens ist das Strecken (Abb. 3), das eine Verlängerung des Stückes unter gleichzeitiger Querschnittsabnahme bewirkt. Beim Handschmieden wird das Werkstück zur Erzielung guten Durchschmiedens und Beseitigung der Breitung im allgemeinen nach jedem Schlag um 90° gewendet. Beim Arbeiten mit Maschinenhämmern erfolgt das Strecken quer und das Schlichten längs zur Hammerbahn. Rohre lassen sich durch Strecken über einen Dorn in Längsrichtung oder in tangentialer Richtung herstellen. Stauchen bewirkt im Gegensatz zum Strecken eine Verkürzung der Länge und eine Vergrößerung des Querschnitts. Breiten ergibt eine Vergrößerung der Breite ohne merkliche Querschnitts- und Längenänderungen. Biegen wird auf dem runden oder eckigen Amboßhorn durchgeführt oder bei größeren Stückzahlen im Biegegesenk. Lochen erfolgt mit Lochdornen, wobei je nach Werkstückdicke der Dorn einseitig eingetrieben oder der Durchschlag von beiden Seiten eingebracht wird. Abschroten wird bei dünnen Stücken mit dem Abschrot, bei dickeren mit dem Schrotmeißel durchgeführt. Bei der Massenfertigung von gleichartigen Schmiedeteilen wird das Gesenkschmieden (Abb. 4) angewendet, mit dem größere Genauigkeit und eine bessere Oberfläche als beim Freiformschmieden erreicht wird bei gleichzeitiger Einsparung an Werkstoff- und Lohnkosten; außerdem lassen sich Werkstücke erzeugen, die durch Freiformschmieden nicht herstellbar sind. Bei dem Gesenkschmieden wird das erhitzte Rohstück in eine dem fertigen Werkstück entsprechende Hohlform (Gesenk) geschlagen oder gepreßt und nimmt dabei deren Form an. Die meist zwei- oder mehrteiligen Gesenke bestehen im allgemeinen aus speziellen warm- und verschleißfesten Stählen. Der überschüssige Werkstoff entweicht beim Schmieden in Form eines Grates zwischen den Gesenkhälften und wird durch Abgratgesenke (Stempel + Schnittplatte) abgetrennt. Zur Herstellung von Stangenmaterial dienen offene Gesenke, wobei das Werkstück stetig vorgeschoben und gewendet wird. Beim geschlossenen Gesenk erfolgt die Formung zwischen Ober- und Untergesenk. Teilweise werden die Rohlinge vorgeschmiedet oder in einem oder mehreren Arbeitsgängen in Vorgesenken vorgeformt. Beim Genauschmieden wird das entsprechend berechnete Werkstoffvolumen mit einem Schlag in dem Fertiggesenk geformt oder es wird erst in einem Vor- und dann im Fertiggesenk hergestellt.



SPANENDE BEARBEITUNG I

Die spanenden oder spanabhebenden Formungsverfahren arbeiten im Gegensatz zu der spanlosen Formung mit einer Materialabtragung. Als Werkstoffe für die Werkzeugschneider dienen Werkzeugstähle, Schnellarbeitsstähle, Hartmetalle, oxidkeramische Stoffe und Diamanten. Die Auswahl der Verfahren ist abhängig von der zu erzeugenden Form, der Zerspanbarkeit des Werkstoffes, der angestrebten Genauigkeit und Oberflächengüte und der Wirtschaftlichkeit.

Im folgenden werden nur kurz die verschiedenen spanenden Bearbeitungsverfahren besprochen. Bei fast allen sind eine Fülle von Werkzeugformen entwickelt worden, die jeweils speziellen Aufgaben dienen. Beim Meißeln (Abb. 1) wird die Werkzeugschneide durch Schlagwirkung in die Werkstückoberfläche getrieben, wobei es zur Erzielung einer gleichmäßigen Spanabnahme wichtig ist, daß der Meißel richtig gehalten wird, damit kein Abgleiten oder kein Einhaken der Meißelschneide in die Oberfläche erfolgt. Das Verfahren dient vorwiegend dem Trennen – durch Abheben von Spänen oder nach dem sogenannten Spaltverfahren – und weiterhin dem Abscheren von Kanten. Kneif-, Beiß- oder Zwickzangen sind als Doppelmeißel zu betrachten. Hobeln und Stoßen (Abb. 2) sind dem Meißeln vergleichbare maschinelle Arbeitsvorgänge, bei denen die Spanabnahme in einer Richtung erfolgt. Die zum Spanen erforderliche Relativbewegung wird durch Hin- und Her- oder Auf- und Abbewegung des Werkzeugs oder des Werkstückes erzielt.

Die Spanabnahme erfolgt beim Sägen (Abb. 3) mit hintereinander angeordneten Sägezähnen, wobei die Abspanung bei Handsägen vorwiegend durch Stoß, bei Maschinensägen dagegen durch Zug erfolgt. Band- und Kreissägen ermöglichen einen kontinuierlichen Schnitt. Zahnform, Zahnteilung und Zahl der Zähne sind bei den Sägen außerordentlich vielfältig. Kreissägen größeren Durchmessers haben oft auswechselbare Einzelzähne oder Zahnsegmente. Das Sägen dient vor allem zum Trennen und zum Einsägen und Aussägen von Material nicht zu großer Stärke. Zum Trennen dicken, noch warmen Materials dienen Warmsägen oder auch Trennscheiben, die mit großen Schnittgeschwindigkeiten arbeiten und bei denen die Abtrennung durch Schmelzen des Metalls infolge Erhitzung an der Trennfläche beschleunigt wird. Ebenso arbeiten Schmelzbandsägen und Abstechschleifmaschinen.

Beim Feilen (Abb. 4) lassen sich durch Anwendung entsprechend geformter Feilen beliebig viele Formen aus dem Werkstoff herausarbeiten. Die Spanung übernehmen dabei die Feilenzähne der Feile, wobei die Schnittwinkel durch deren Herstellung bedingt und bei gehauenen und gefrästen Feilen unterschiedlich sind. Bei der Bearbeitung wird im allgemeinen die Werkstoffabtragung mit grobhiebigen Schruppfeilen, die eine entsprechende Spanleistung haben, erzielt und dann mit feinhieberigen Schlichtfeilen nachgearbeitet. Die vielfältigen Feilenarten sind benannt nach Feilenform oder -querschnitt, Hiebart, Größe und dem durchzuführenden Arbeitsgang. Vorwiegend werden Handfeilen benutzt, daneben aber auch Feilenmaschinen verwendet. Das Verfahren dient vor allem der Bearbeitung vorgeformter Werkstücke zur Erzielung der angestrebten Endform und Abmessungen sowie einer glatten Oberfläche, weiterhin zum Entgraten, Kantenbrechen und Ausschneiden.

Räumer (Abb. 5) sind mit sägezahnartigen Schneiden besetzte Arbeitsgeräte, die je nach Profil des Werkzeuges, der Herstellung und Bearbeitung von äußeren oder inneren Werkstückteilen dienen. Das Werkzeug ist hierbei so ausgebildet, daß durch die nacheinander auf das Werkstück einwirkenden Schneiden in einem Arbeitsgang zunächst das Schruppen und abschließend die Feinstbearbeitung erfolgt; beispielsweise läßt sich mit einer Räumnadel, die langsam in geradliniger, rotierender oder spiralförmiger Bewegung durch ein vorgearbeitetes Loch gezogen wird, durch allmähliche Spanabnahme mit immer kleiner werdendem Span das fertige, geglättete Profil herstellen.

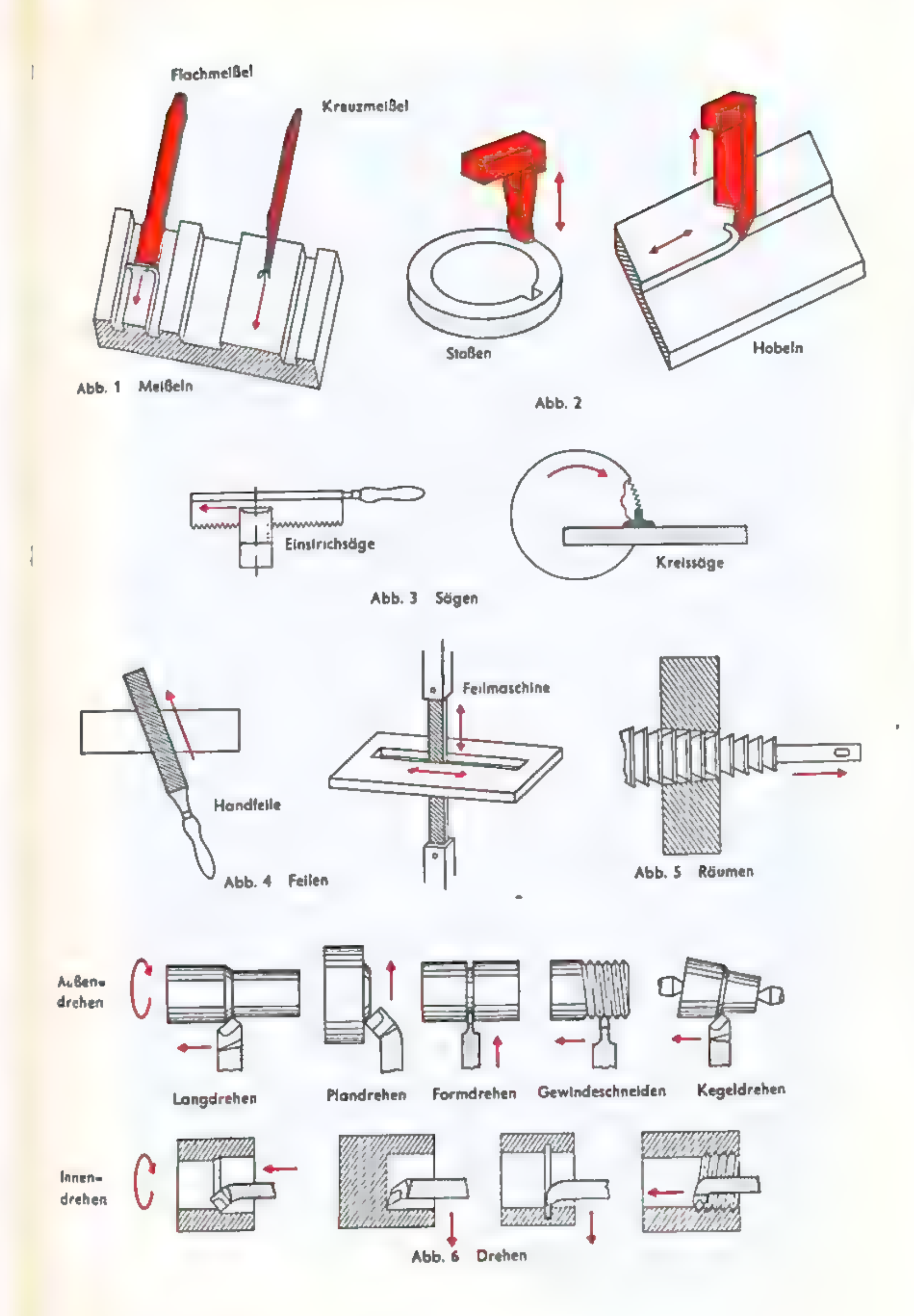


Abb. 1 Meißeln

Abb. 2

Abb. 3 Sägen

Abb. 4 Feilen

Abb. 5 Räumen

Abb. 6 Drehen

SPANENDE BEARBEITUNG II

Das Drehen (Abb. 6, S. 181) ist eines der wichtigsten spanenden Bearbeitungsverfahren und dient vorwiegend der Herstellung von Drehkörperformen aller Art. Das Werkstück wird dabei in Drehbewegung versetzt und der Drehmeißel so zur Drehachse bewegt, daß er die angestrebte Form herausarbeitet. Beim Langdrehen läuft der Meißel parallel zur Drehachse, und es ergeben sich zylindrische Formen. Auf ähnliche Weise erfolgt das Gewindedrehen mit dem Profilmeißel. Beim Plandrehen erfolgt der Meißelvorschub senkrecht zur Drehachse, ebenso beim Ein- und Abstechen zum Einarbeiten von Nuten oder Abtrennen überschüssigen Materials und beim Formdrehen. Durch Kombination von parallel und gleichzeitig senkrecht zur Drehachse erfolgendem Meißelvorschub lassen sich beliebige rotationssymmetrische Formen herstellen. Für die verschiedenen Arbeiten stehen zahlreiche, größtenteils genormte Meißelformen zur Verfügung, die sich in Außendreh-, Innendreh- und Formmeißel unterteilen lassen. Zur Leistungssteigerung haben die Meißel teilweise außer der Hauptschneide noch spezielle Zusatzschneiden.

Das Grundprinzip des Bohrens (Abb. 7) besteht darin, daß mit den in bestimmten Winkeln angeordneten Schneiden unter dem Druck des Vorschubs und durch die Drehbewegung des Bohrers die Spanabnahme am Bohrungsgrund erfolgt und dieser in den Werkstoff eindringt. Die Späne werden durch spiralförmig ausgebildete Nuten in dem Bohrerschaft aus der Bohrung abtransportiert, was teilweise noch durch Anwendung von Kühlmitteln begünstigt wird. Je nach Art des verwendeten Bohrers lassen sich Bohrungen in den vollen Werkstoff einbringen oder vorhandene Bohrungen aufbohren, aufweiten oder glätten.

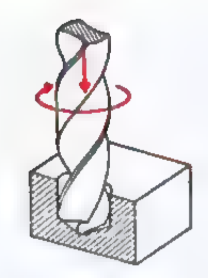
Das Senken (Abb. 8) ist ein dem Bohren vergleichbarer Arbeitsvorgang. Es wird auf Bohrmaschinen durchgeführt und dient vorwiegend dem Einbringen von Zentrierbohrungen für Teile, die durch Drehen bearbeitet werden sollen oder für Vertiefungen, Senkschrauben und Senkniete.

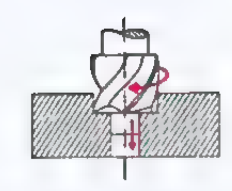
Die Spanung erfolgt beim Fräsen (Abb. 9) mit zahnartigen Schneiden, die am Umfang und an der Stirnfläche zylindrischer, kegelförmiger oder scheibenförmiger Drehkörper angeordnet sind und nacheinander zum Schnitt gelangen. Die Fräszähne sind entweder aus dem Trägermaterial herausgearbeitet oder eingesetzt und dann vorwiegend aus Hartmetallen.

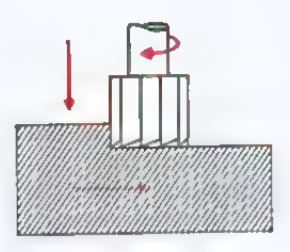
Für das Schneiden von Außengewinden ohne besonderen Gütegrad werden von Hand bediente Gewindeschneideisen oder Schneideisenkapseln verwendet, für Rohre Gewindeschneidkluppen und für Innengewinde Gewindebohrer. Das Gewinde wird dabei in einem oder mehreren aufeinanderfolgenden Arbeitsgängen geschnitten.

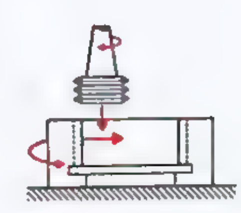
Beim Rundfräsen werden Werkzeug und Werkstück gedreht, beim Langplanfräsen (Walzfräsen) dreht sich der walzenförmige Fräser, während das Werkstück eine geradlinige Vorschubbewegung durchführt ebenso wie beim Flach- oder Stirnfräsen, bei dem die Schneiden auf dem Umfang einer Scheibe angeordnet sind. Je nachdem, ob das Fräsen mit der oder gegen die Vorschubrichtung erfolgt, wird zwischen Gleichlauf- und Gegenlauffräsen unterschieden.

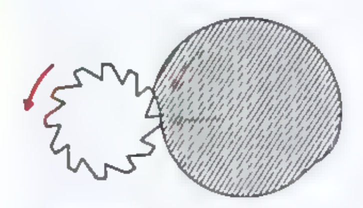
Die Abarbeitung des Werkstoffes erfolgt beim Schleifen (Abb. 10) mit Schleifmitteln hoher Härte, wie Siliciumcarbid oder Elektrokorund. Diese sind in mineralischen, organischen oder keramischen Bindemitteln gebunden und zu Schleifscheiben oder Schleifkörpern geformt oder auf Bändern aufgebracht. Die Schleifarbeiten können von Hand am Schmirgelbock erfolgen, meistens werden aber Schleifmaschinen verwendet. Abschleifen ersetzt das Feilen, Fräsen, Hobeln, Scharfschleifen dient dem Schärfen von Werkzeugen. Unter dem Begriff Maß- und Formschleifen sind die Verfahren zusammengefaßt, die der Herstellung verschiedener, rotationssymmetrischer Innen- oder Außenprofile und maßgenauer Flächen dienen. Zum Schleifen kleiner zylindrischer Körper wird die Spitzenlosschleifmaschine eingesetzt, bei der das Werkstück zwischen zwei Schleifscheiben bearbeitet wird.


Abb. 7 Bohren


Abb. 8 Senken


Flachfräsen


Gewindefräsen


Rundfräsen

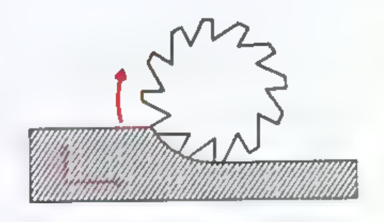
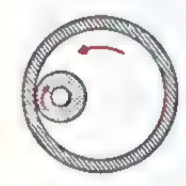
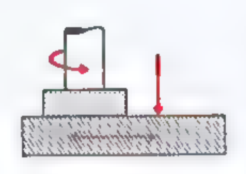

Langplanfräsen (Walzfräsen)

Abb. 9 Fräsen


Rundschleifmaschine


Planschleifmaschine

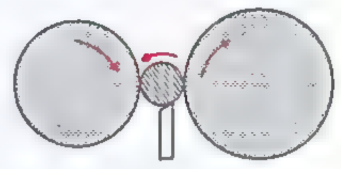

Spitzenlosschleifmaschine

Abb. 10 Schleifen

SCHWEISSEN I (PRESSSCHWEISSEN)

Metallschweißen ist ein Vereinigen metallischer Werkstoffe unter Anwendung von Wärme, Druck oder von beidem, und zwar mit oder ohne Zusätzen von artgleichem Werkstoff (Zusatzwerkstoff) mit gleichem oder nahezu gleichem Schmelzbereich. Preßschweißverfahren: Bei dem Preßschweißen wird das Werkstück zunächst örtlich an der Verbindungsstelle erhitzt und nachfolgend im plastischen Zustand unter Druck zusammengefügt. Zusatzwerkstoff wird dabei im allgemeinen nicht verwendet. Bei der Kaltpreßschweißung erfolgt die Vereinigung unter sehr hohem Druck ohne Wärmeeinwirkung und Zusatzwerkstoff. Zu dem letztgenannten Verfahren gehören auch das Ultraschallschweißen (US-Schweißen) und das Explosionsschweißen.

Das älteste der Verfahren, welches heute fast nur noch im Kunstschmiede- und Schlosserhandwerk Verwendung findet, ist das Feuerschweißen, wobei die Werkstückteile im Schmiedefeuer oder Ofen erhitzt und durch Hämmern (Hammerschweißung) oder durch Pressen und Walzen miteinander verbunden werden.

Beim Gaspreßschweißen (Abb. 1) werden die Teile durch eine Brenngas-Luft- oder Brenngas-Sauerstoff-Flamme erwärmt und durch stetiges oder schlagartiges Stauchen zusammengefügt. Das Verfahrensprinzip findet u. a. beispielsweise zur Herstellung von Rohren kleineren Durchmessers mit nicht zu großen Wandstärken aus Stahlbändern Anwendung (Fretz-Moon-Verfahren). Die Bänder bestimmter Breite werden durch einen Ziehtrichter und Profilwalzen zu einem Schlitzrohr geformt, örtlich durch Gasbrenner im Durchlaufofen auf Schweißtemperatur erhitzt und die Kanten mit Druckrollen aufeinander gepreßt und verschweißt. Die Wärme wird bei dem Lichtbogen-Preßschweißen und den daraus abgeleiteten Spezialverfahren durch einen kurzzeitig zwischen den Teilen brennenden Lichtbogen erzeugt und die Verbindung durch nachfolgendes schlagartiges Stauchen hergestellt. Bei dem Widerstandspreßschweißen (Abb. 2) tritt die Erwärmung bei Stromdurchgang durch den elektrischen Widerstand des Werkstoffes, insbesondere durch den hohen Widerstand an der Berührungsstelle der Werkstückteile ein, die nach Erreichung der Schweißhitze unter Druck vereinigt werden; u. U. kann an der Berührungsstelle eine Verflüssigung eintreten. Der Strom wird direkt über entsprechende Elektroden oder induktiv zugeführt. Auf dem erstgenannten Prinzip basiert unter anderem das Widerstandsstumpfschweißen (Abb. 2a), bei dem die Werkstückteile fest aneinander stoßend in Spannbacken aus Kupfer eingeklemmt sind, über die der elektrische Strom zugeführt wird. Nach Erreichung der Schweißhitze wird der Strom abgeschaltet und der Stauchdruck zur Erzielung der Verschweißung erhöht.

Nach ähnlichem Prinzip wie das Widerstandsstumpfschweißen arbeitet das Punktschweißen (Abb. 2b), das der Herstellung von Schweißteilen aus Blechen und Drähten dient. Der Strom wird dabei über entsprechend geformte Druckelektroden zugeführt. Das Nahtschweißen (Abb. 2c) verwendet scheibenförmige Elektrodenrollen zur Herstellung einer nahtförmigen Verbindung von Blechen. Bei dem Buckelschweißen (Abb. 2d), das zur Verschweißung von dünnwandigen Blechteilen dient, werden in eines der beiden Bleche örtliche Ausbeulungen eingedrückt und in einer Schweißpresse über großflächige Plattenelektroden die Verschweißung erzielt, wobei die Anzahl der Schweißpunkte der Anzahl der Buckel entspricht und unter Einwirkung des Druckes gleichzeitig wieder eine Einebnung der Buckel erfolgt. Weit verbreitete Anwendung findet das Widerstandspreßschweißen für die Herstellung von Rohren, wobei drei Verfahrensarten zu unterscheiden sind. Ausgangsmaterial ist bei allen drei Verfahren ein aus endlosem Band im Profilwalzwerk hergestelltes Schlitzrohr.

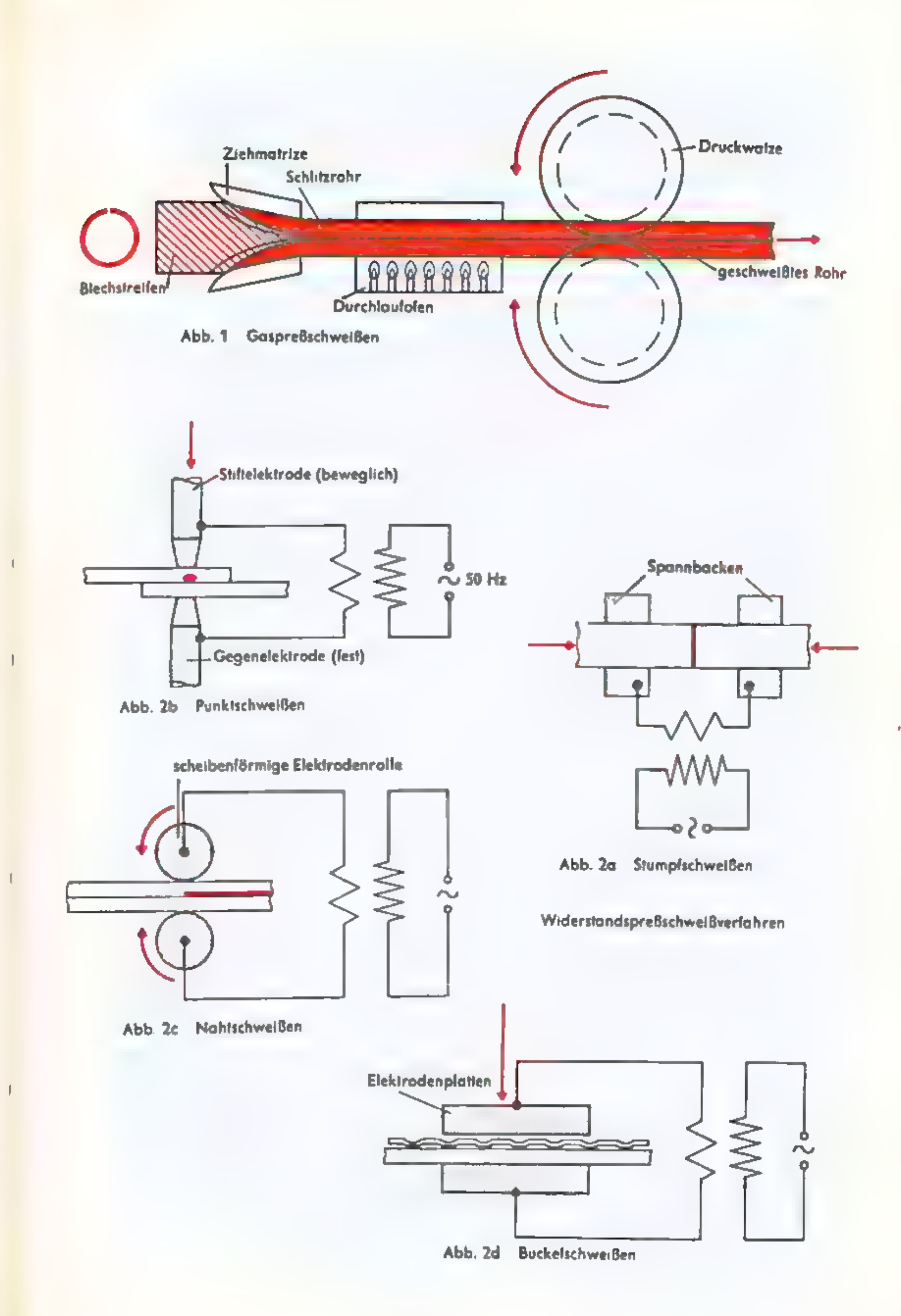


Abb. 1 Gaspreßschweißen

Abb. 2b Punktschweißen

Abb. 2a Stumpfschweißen

Widerstandspreßschweißverfahren

Abb. 2c Nahtschweißen

Abb. 2d Buckelschweißen

SCHWEISSEN II (SCHMELZSCHWEISSEN)

Bei dem Schmelzschweißen werden die Werkstückteile durch Aufschmelzen des Werkstoffes im Bereich der Verbindungsstelle ohne zusätzliche Druckeinwirkung miteinander verbunden. Dieses ist wie beim Preßschweißen ohne Zusatzwerkstoff möglich, jedoch wird meistens mit Zusatzwerkstoff gearbeitet, den man in Draht- oder Stabform zuführt und der der Füllung der Schweißfuge dient. Der Zusatzwerkstoff hat normalerweise die gleiche Zusammensetzung wie der Grundwerkstoff und enthält höchstens zur Verbesserung des Flusses oder zur Erzielung eines besonders dichten, feinkörnigen Schweißgefüges geringfügige Legierungszusätze. Die Schweißdrähte oder -stäbe sind in vielen Fällen noch mit speziellen Umhüllungen versehen, die als Flußmittel dienen, die vorhandenen Oxide oder andere störende Stoffe entfernen, die Benetzbarkeit der Werkstoffoberfläche verbessern, die Schweißstellen vor äußeren Einflüssen schützen sowie zu schnelle Abkühlung verhindern und beim Lichtbogenschweißen den Lichtbogen stabilisieren. Die Zusammensetzung der Umhüllungen richtet sich vor allem nach dem Werkstoff und dem Schweißverfahren; vorwiegend werden Gemische von Eisen-, Mangan-, Titanoxiden und Erdalkalikarbonaten, Flußspat und organischen Verbindungen eingesetzt. Als Wärmequellen kommen wie beim Preßschweißen Gas, elektrischer Strom, chemische Umsetzungen u.a. in Frage. Die Autogen- oder Gasschweißverfahren (Abb.1) arbeiten zur Verflüssigung des Werkstoffes im Bereich der Schweißstelle mit Brenngas-Sauerstoff- oder Brenngas-Luft-Flammen, die in entsprechenden Schweißbrennern erzeugt werden. Als Brenngas wird dabei hauptsächlich Acetylen verwendet, daneben aber auch Wasserstoff, Propan, Butan und Benzol. Bei der Gas-Schmelzschweißung von Hand sind zwei Arbeitsweisen zu unterscheiden: die Nachlinksschweißung (Vorwärtsschweißung) und die gebräuchlichere Nachrechtsschweißung (Rückwärtsschweißung). Die Widerstandserwärmung nützt das neue, in der UdSSR entwickelte, automatisierte Elektroschlackeschweißen (Abb. 2), wobei die Aufschmelzung im Bereich der Schweißstelle durch ein elektrisch leitendes Schlackenbad erzielt wird, dessen Temperatur über der Schmelztemperatur des Metalls liegt. Die Nähte werden als Stehnähte aufgebaut, und es lassen sich beispielsweise Stumpfnähte an Platten von 40–600 mm Stärke bis zu großen Längen sehr schnell und wirtschaftlich schweißen. Der Strom wird dem Schlackenbad über abschmelzende, blanke, als Zusatzwerkstoffe dienende Metallelektroden zugeführt. Der abschmelzende Zusatzwerkstoff sinkt in der Schlacke ab, füllt die Schweißfuge und erstarrt darin langsam von unten nach oben zu der verbindenden Schweißnaht. Das Schweißbad in Form einer rechteckigen Schmelzwanne wird an zwei Seiten durch die Nahtfugenflächen der beiden Schweißteile, an den beiden anderen Seiten durch ein Paar wassergekühlte Kupfergleitschuhe begrenzt, die mit dem gesamten Schweißkopf durch entsprechende Vorrichtungen nach oben an der Schweißfuge entlang bewegt werden. Die größte Bedeutung unter den Schmelzschweißverfahren hat das Lichtbogenschweißen, bei dem ein elektrischer Lichtbogen zum Aufschmelzen des Grundwerkstoffes und des Zusatzwerkstoffes dient. Der Zusatzwerkstoff wird dabei als Elektrode geschaltet oder aber stromlos zugeführt. Die Verfahren lassen sich in drei Gruppen unterteilen: in die mit sichtbar brennendem offenem, die mit verdecktem Lichtbogen und die, bei denen der Lichtbogen unter Schutzgasen brennt. Bei dem offenen Lichtbogenschweißen nach Benardos (Abb. 3a) wird mit Gleichstrom gearbeitet und der Lichtbogen zwischen Werkstoff und einer Kohleelektrode geführt. Auf Zerener (Abb. 3b) geht das Verfahren zurück, das mit zwei Kohleelektroden arbeitet, wobei die Wärme des Kohlelichtbogens durch eine zusätzliche Magnetspule auf dem Werkstück konzentriert wird. Bei dem heute am meisten angewandten Verfahren nach Slavjanow (Abb. 3c) brennt der Lichtbogen zwischen einer abschmelzenden Metallelektrode aus dem Zusatzwerkstoff und dem Werkstück.

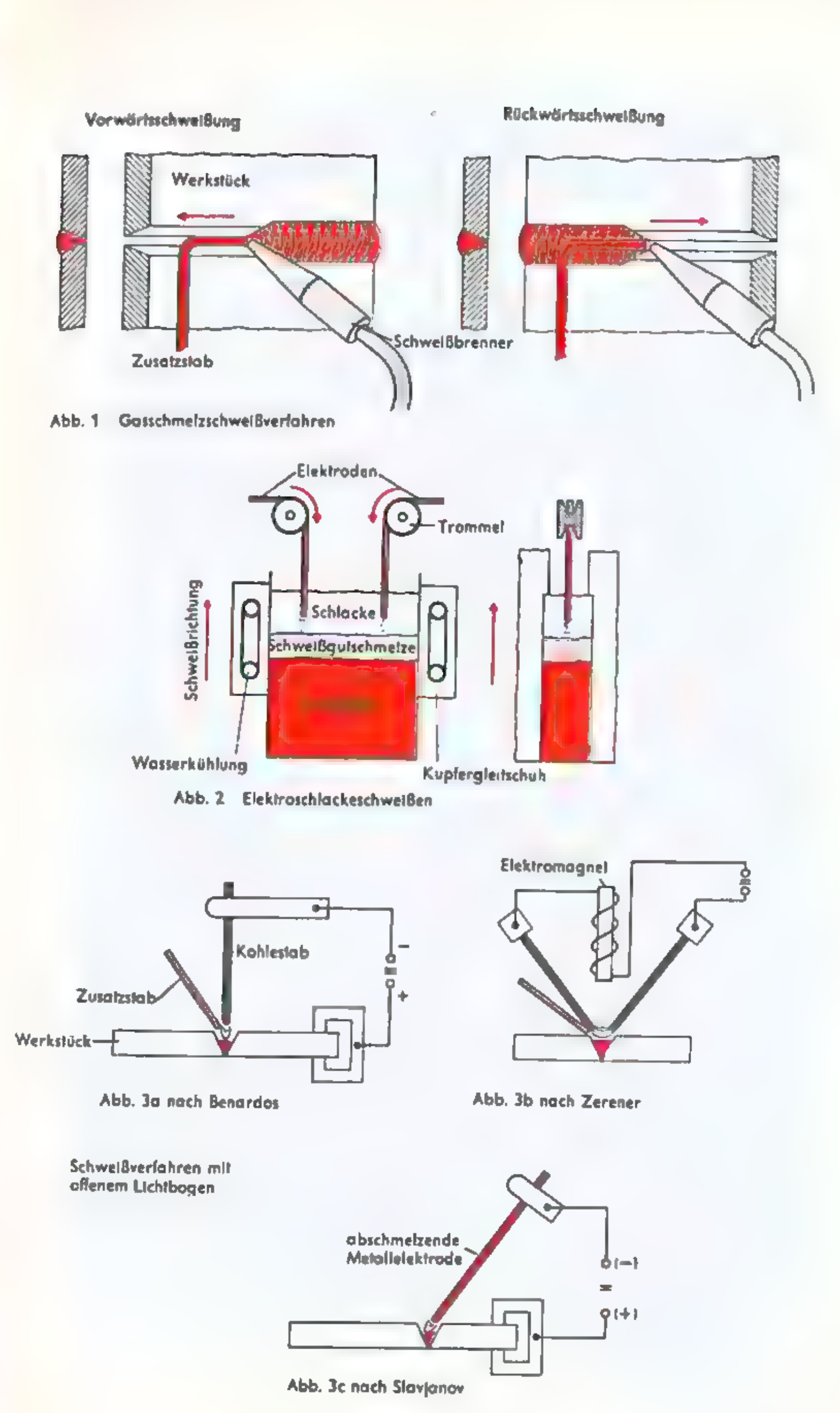


Abb. 1 Gasschmelzschweißverfahren

Abb. 2 Elektroschlackeschweißen

Abb. 3a nach Benardos

Abb. 3b nach Zerener

Abb. 3c nach Slavjanov

LÖTEN

Löten ist ein Verfahren zum Vereinigen metallischer Werkstoffe mit Hilfe eines geschmolzenen Zusatzmetalles (Lot), dessen Schmelztemperatur unterhalb derjenigen der Grundwerkstoffe liegt. Die Grundwerkstoffe werden benetzt, ohne geschmolzen zu werden. Im Gegensatz zum Schweißen ermöglichen die Lötverfahren die Verbindung verschiedener, nicht artgleicher metallischer Werkstoffe zu einer Konstruktion. Die Benennung der Lötverfahren richtet sich im wesentlichen: nach der Arbeitstemperatur, Weichlöten (Abb. 1) erfolgt bei Temperaturen unter 450°C, Hartlöten (Abb. 2) bei Temperaturen über 450°C; nach dem Verwendungszweck, wie Verbindungslöten oder Auftragslöten, das beispielsweise der Erzielung glatter Oberflächen oder der Reparatur von Gußstücken dient; nach der Art der Wärmequelle. Weitere Einteilung erfolgt nach der Form der Lötstelle. Beim Spaltlöten haben die zu verbindenden Teile gleichbleibenden parallelen Abstand unter 0,5 mm, beim Fugenlöten Abstände über 0,5 mm oder eine v- oder x-förmige Lötfuge. Bei der Benennung nach der Art der Lotzuführung ist zu unterscheiden zwischen dem Löten mit angesetztem Lot, wobei das Lot nach Erhitzen des Werkstückes auf Löttemperatur durch Berührung mit dem Werkstück oder der Wärmequelle geschmolzen wird; dem Löten mit eingelegtem Lot, wobei die abgemessene Lotmenge möglichst dicht am Lötspalt angebracht und dann gemeinsam mit dem Werkstück erhitzt wird und dem Tauchlöten (Abb. 3), das durch Eintauchen der zusammengespannten Werkstückteile in das geschmolzene Lot bewirkt wird.

Das Lot wird in Form von Stäben, Drähten, Blechen, Körnern, Pulver oder für Lötkolben auch als Paste verwendet. Zum Weichlöten werden vorwiegend niedrig schmelzende Legierungen auf Blei-, Antimon- und Zinnbasis verwendet, zum Hartlöten unlegiertes Kupfer, Messing- und Silberlote und für Leichtmetalle Hartlote auf der Basis von Aluminium, Silicium, Zinn und Kadmium. Teilweise wird unter Zusatz von Flußmitteln gearbeitet, die die Werkstückoberfläche reinigen, die Benetzbarkeit und den Lötfluß verbessern und die Bildung von Oberflächenfilmen verhindern sollen. Um Lot und Werkstück beim Aufheizen und während der Lötung vor Oxydation zu schützen oder eventuelle Oxidbeläge von Lot und Werkstück zu Metall zu reduzieren, wird die Lötung auch teilweise unter Schutzgas vorgenommen. Für die Weichlötung von Hand wird der durch elektrischen Strom oder indirekt in einer anderen Wärmequelle, z. B. Schmiedefeuer oder Gasflamme, erhitzte Kupferlötkolben oder die mit Benzin arbeitende Lötlampe verwendet. Für die Hartlötung werden Gasbrenner, Gebläsebrenner oder auch Schweißbrenner eingesetzt. Die Arbeitsfolge ist dabei im allgemeinen folgende: Freilegung der metallischen Oberfläche, Sichern der Werkstücklage, Auftragen des Flußmittels, Erhitzen des Werkstückes auf die erforderliche Arbeitstemperatur, Zuführen des Lotes und nach Abkühlung Entfernung der Flußmittelreste. Zum Weich- und Hartlöten in der Serien- und Massenfabrikation ist die bereits genannte Tauchlötung gebräuchlich oder auch die Lötung des vorher mit Lot versehenen Werkstückes im Salz- oder Ölbad (Abb. 5) entsprechender Arbeitstemperatur. Beim Durchgießlöten (Abb. 4) läuft das Lot durch die überhitzte Lötfuge, bis die Verbindung eintritt. Außerdem können mit Lot oder Flußmittel bestrichene Werkstücke im Schmiedefeuer oder Ofen auch unter Schutzgas gelötet werden. Bei der elektrischen Widerstandslötung (Abb. 6) werden Lot, Flußmittel und Werkstück zwischen Elektroden aus Kupfer oder Wolfram erhitzt und miteinander verbunden, beim Induktionslöten (Abb. 7) erfolgt die Lötung dagegen unter Einwirkung des Feldes hochfrequenten Wechselstromes. Ein neueres Verfahren ist das Ultraschallöten, welches beispielsweise zur Lötung von Aluminiumwerkstoffen Anwendung findet. Dabei werden die Ultraschallschwingungen über einen Nickelstab durch das Lot hindurch auf die Werkstückoberfläche übertragen und die Oxidhaut des Aluminiums zerstört.

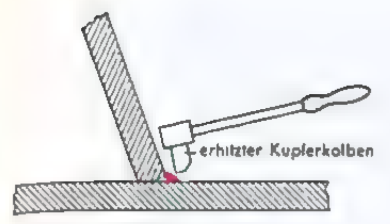


Abb. 1 Weichlöten mit Lötkolben

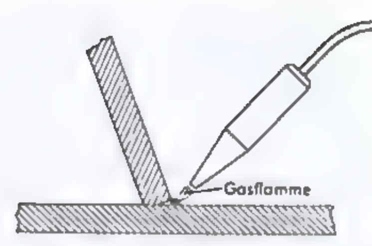


Abb. 2 Hartlöten

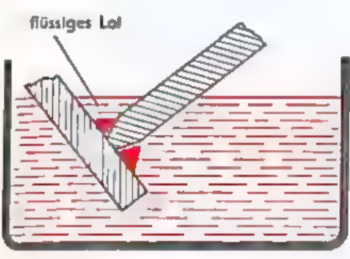


Abb. 3 Tauchlöten

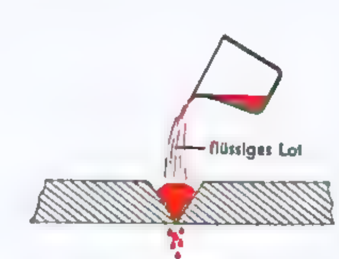


Abb. 4 Durchgießlöten

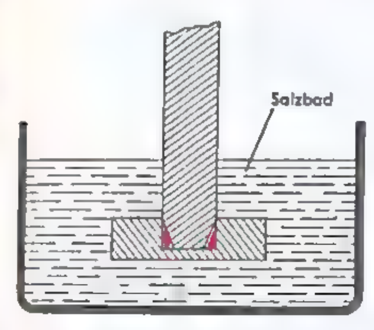


Abb. 5 Löten im Salzbad

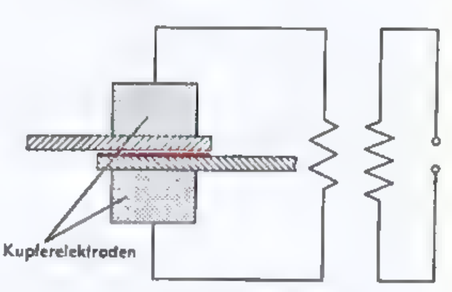
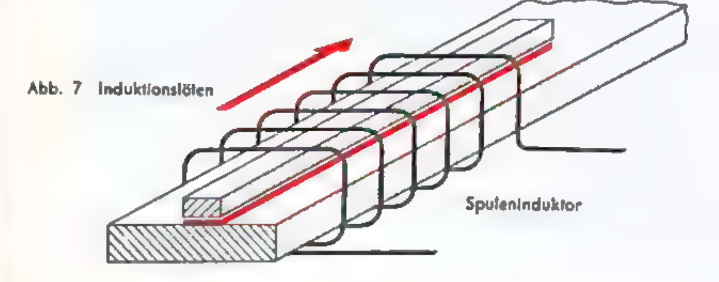


Abb. 6 Widerstandslöten

Abb. 7 Induktionslöten



VERZINKEN

Unter den metallischen Überzügen zum Rostschutz auf Eisen und Stahl spielen Zinküberzüge eine sehr bedeutende Rolle, und aus dem täglichen Umgang sind verzinkte Rohr-, Stahlband-, Drahterzeugnisse und Blechwaren, wie beispielsweise Mülltonnen, Eimer, Gießkannen und Wannen allgemein bekannt. Das gebräuchlichste Verzinkungsverfahren ist die Feuerverzinkung, wobei der Zinküberzug durch Eintauchen der Gegenstände in eine Zinkschmelze erzeugt wird. Das Zink reagiert dabei mit dem Eisen unter Bildung von Eisen-Zinkmischkristallen, und es entsteht ein Überzug guter Haftfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit (Abb. 1). Weniger häufig eingesetzt werden die galvanische Verzinkung, die Spritzverzinkung (ein Flammspritzverfahren) und das Sherardisieren. Zur Erzielung eines einwandfreien Überzuges ist es erforderlich, daß die Gegenstände eine reine Oberfläche aufweisen, die frei ist von Öl, Fett oder Farbe, aber auch von Zunder, Schmutz und Korrosionsprodukten. Die Vorbehandlung umfaßt die Arbeitsgänge (Entfettung), Beizen, (Spülen), Flußmittelbehandlung und (Trocknung), wobei die Klammern andeuten, daß diese Arbeitsgänge teilweise wegfallen. Ist eine Entfettung notwendig, so richtet sich die Art des Lösungsmittels und des Verfahrens nach dem Grad der Verschmutzung und der Natur der Fette. Die Entfernung der Oxidschichten erfolgt durch Beizen mit verhältnismäßig starken, wäßrigen Lösungen von Salzsäure oder Schwefelsäure. Bei Salzsäure wird der Zunder in erster Linie chemisch gelöst, und der Untergrund wenig angegriffen, während die Schwefelsäure mit dem Eisen reagiert und der Zunder durch die dabei auftretende Wasserstoffentwicklung zum Abplatzen gebracht wird. Gußteile, denen noch Sand anhaftet, werden vor dem Beizen durch mechanische Behandlung in Trommeln oder durch Sandstrahlen vorgesäubert und durch Zusatz von Flußsäure der restliche Sand bei dem Beizprozeß abgelöst. Dem Beizen folgt eventuell das Spülen in Wasser und dann die Flußmittelbehandlung. Das Flußmittel, meist eine Mischung von Chlorzink und Ammoniumchlorid, hat die letzten Reste von Verunreinigungen zu beseitigen und die Benetzbarkeit der Oberfläche zu erhöhen. Bei der *Naßverzinkung* (Abb. 3) wird das Flußmittel auf das Zinkbad aufgeschmolzen und der betreffende Gegenstand durch die Flußmittelschicht in das Zinkbad gebracht. Bei der *Trockenverzinkung* (Abb. 2) werden die Teile in eine wäßrige Flußmittellösung getaucht und danach getrocknet. Dabei entsteht ein dünner Film, der im Zinkbad schmilzt, die notwendige Reinigung übernimmt und dann abkocht. Die eigentliche Verzinkung erfolgt im flüssigen Zink bei etwa 450–470 °C in einem beheizten Kessel aus Stahlblech oder in Sonderfällen aus keramischen Stoffen. Da das Zink die eisernen Kesselwände angreift, ist es wichtig, daß die Beheizung der Kessel möglichst gleichmäßig ist, was durch Kesselkonstruktion und entsprechende Führung und Regulierung der Heizung zu erreichen ist.

Das *Sherardisieren* beruht darauf, daß die Gegenstände in Zinkstaub eingebettet und bei etwa 400 °C unter Luftabschluß in speziellen Trommeln geglüht werden, wobei durch Diffusionsvorgänge eine Eisen-Zink-Legierungsschicht entsteht. Verwendung findet das Verfahren vor allem für kleine Massenartikel, wie beispielsweise Nägel, Stifte, Schrauben, Muttern, Ketten und Ventilteile.

Zur Verzinkung von Bändern kommt das *Sendzimirverfahren* (Abb. 4) zur Anwendung. Hierbei rollt das Band von einer Spule (1) der Oxydation der Öl- und Fettreste bei erhöhter Temperatur zu (2). Nach dem Weichglühen und der Reduktion der Oxide in Ammoniak (3) erfolgt die Abkühlung auf 500 °C und das Eintauchen in das Zinkbad unter Luftabschluß (4). Die eigentliche Verzinkung geschieht nun bei etwa 450 °C, wobei das Zink durch die Temperatur des Bandes flüssig gehalten wird (5). Nach dem Austreten des Bandes aus dem Zinkbad wird es zu Blechen geschnitten (6) oder aufgerollt (7).

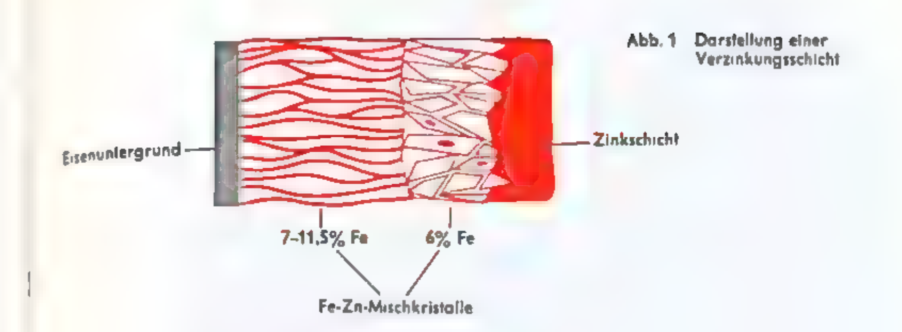


Abb. 1 Darstellung einer Verzinkungsschicht

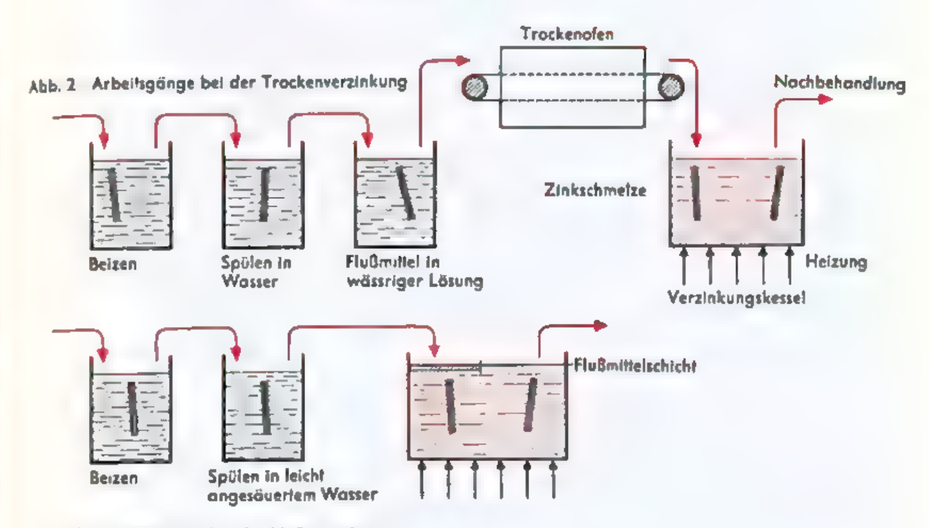


Abb. 2 Arbeitsgänge bei der Trockenverzinkung

Abb. 3 Arbeitsgänge bei der Naßverzinkung

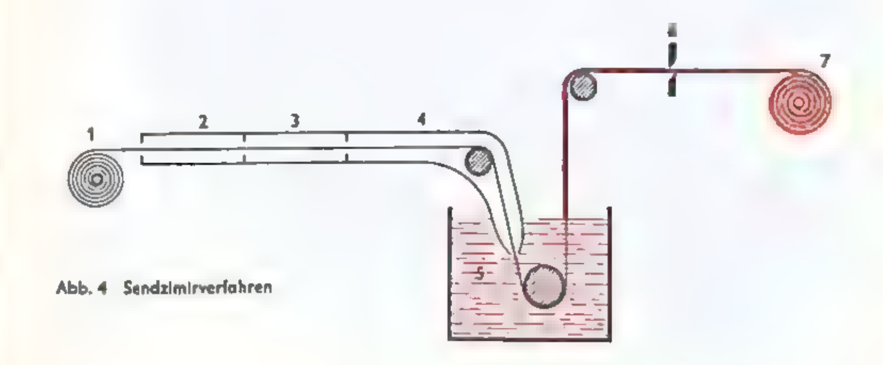


Abb. 4 Sendzimirverfahren

GALVANOÜBERZUG

Unter den verschiedenen Verfahren zur Herstellung von Überzügen auf Metallen spielen die galvanischen eine sehr wesentliche Rolle. Die galvanischen Überzüge dienen dabei als reiner Korrosionsschutz (z. B. Verzinkung und Verzinnung von Eisen), zu dekorativen Zwecken (z. B. Vergoldung und Versilberung) oder übernehmen beide Funktionen gleichzeitig (z. B. Verchromung). Das Prinzip der galvanischen Verfahren beruht darauf, daß das Deckmetall mittels elektrischen Stromes aus seiner wäßrigen, sauren oder alkalischen Elektrolytlösung auf dem Grundmetall niederschlägt (Abb. 2). Das mit dem Überzug zu versehende Werkstück wird dabei als Kathode (— Pol) geschaltet, als Anode (+ Pol) dient im allgemeinen eine Platte aus dem abzuscheidenden Metall, die sich während des Elektrolysevorgangs langsam auflöst. Als Stromquelle wird Niederspannungsgleichstrom eingesetzt. Ein Sonderverfahren ist die Metallabscheidung mit Umpolung, was besonders für cyanidische Kupferbäder Anwendung findet. Durch die Stromumpolung in bestimmten Zeitabständen wird dabei immer wieder ein Teil des abgeschiedenen Metalls aufgelöst, wodurch der Überzug besonderen Glanz erhält. Glänzende Oberflächen lassen sich aber auch durch Zusatz von speziellen Glanzbildnern erzielen. Sehr häufig werden die Gegenstände mit zwei oder mehreren Schichten aus verschiedenen Metallen versehen. So erfordert beispielsweise die Aufbringung einer Glanzchromschicht auf Zinkspritzguß eine Vorverkupferung sowie eine Kupfer- und eine Nickelzwischenschicht vor dem Abscheiden der abdeckenden Chromschicht.

Zur Erzeugung von einwandfreien Überzügen guter Haftfestigkeit ist es notwendig, die Gegenstände vorher einer gründlichen Reinigung zu unterziehen. Die Vorbehandlung erfolgt durch mechanische Verfahren, wie beispielsweise Sandstrahlen, Schleifen, Bürsten und Kratzen, physikalische Verfahren, wie Entfernung der Öle und Fette mit organischen Lösungsmitteln oder auch durch chemische Verfahren. Zu letzteren gehören das Beizen mit Säure, die alkalische Entfettung (Verseifung), die Druckzerstäubung und die oft gebräuchliche elektrolytische Entfettung in alkalischen oder cyankalischen Bädern, unter Umständen noch mit Zusatz von Benetzungsmitteln oder Emulgatoren. Für die Aufbringung der Schichten werden, je nach Elektrolysebedingungen Elektrolysebäder der verschiedensten Größe, Form und Auskleidung verwendet, wie beispielsweise Ring- und Wanderbäder für große Teile als auch Glocken- und Trommelapparate für die Massenbearbeitung von Kleinteilen. Während bei den beiden erstgenannten die Teile in entsprechende Halterungen eingespannt und über diese kathodisch geschaltet werden, wird die Stromzuführung bei den Massenteilen auf anderem Wege erreicht. Bei den Glockenapparaten wird eine punktförmige Kathode in das Kleinteilknäuel hineingeführt, während bei den Trommeln der Strom durch Kontaktleisten, -bänder oder durch Spiralkontakte im Innern der Trommel zugeführt wird. Die Entwicklungen auf diesem Gebiet streben weitgehende Kontrolle, Automatisierung, Erhöhung der Durchsatzmengen und Wirtschaftlichkeit an. Für die Verzinnung und Verzinkung von Bändern aus Eisenwerkstoffen wurden spezielle Bandanlagen entwickelt, die weitgehend automatisch und mit hohen Geschwindigkeiten arbeiten (Abb. 1 und 3). Die im Schema dargestellte Ferrostananlage (Abb. 3) zur Weißblechherstellung arbeitet mit einem Zinnsulfat enthaltenden Elektrolyten auf phenol- oder kresolsulfonsaurer Basis. Bei der Vorbehandlung in dieser Anlage erfolgen Entfettung und Beizung elektrolytisch. Die Durchsatzgeschwindigkeit beträgt etwa 25 m/Min. Mit der abgebildeten einfachen elektrolytischen Verzinkungsanlage (Abb. 4) können Bänder von 0,1–3 mm Stärke und 100–800 mm Breite verzinkt werden, wobei die Bandgeschwindigkeit je nach gewünschter Auflagestärke bei 15—20 m/Min. liegt.

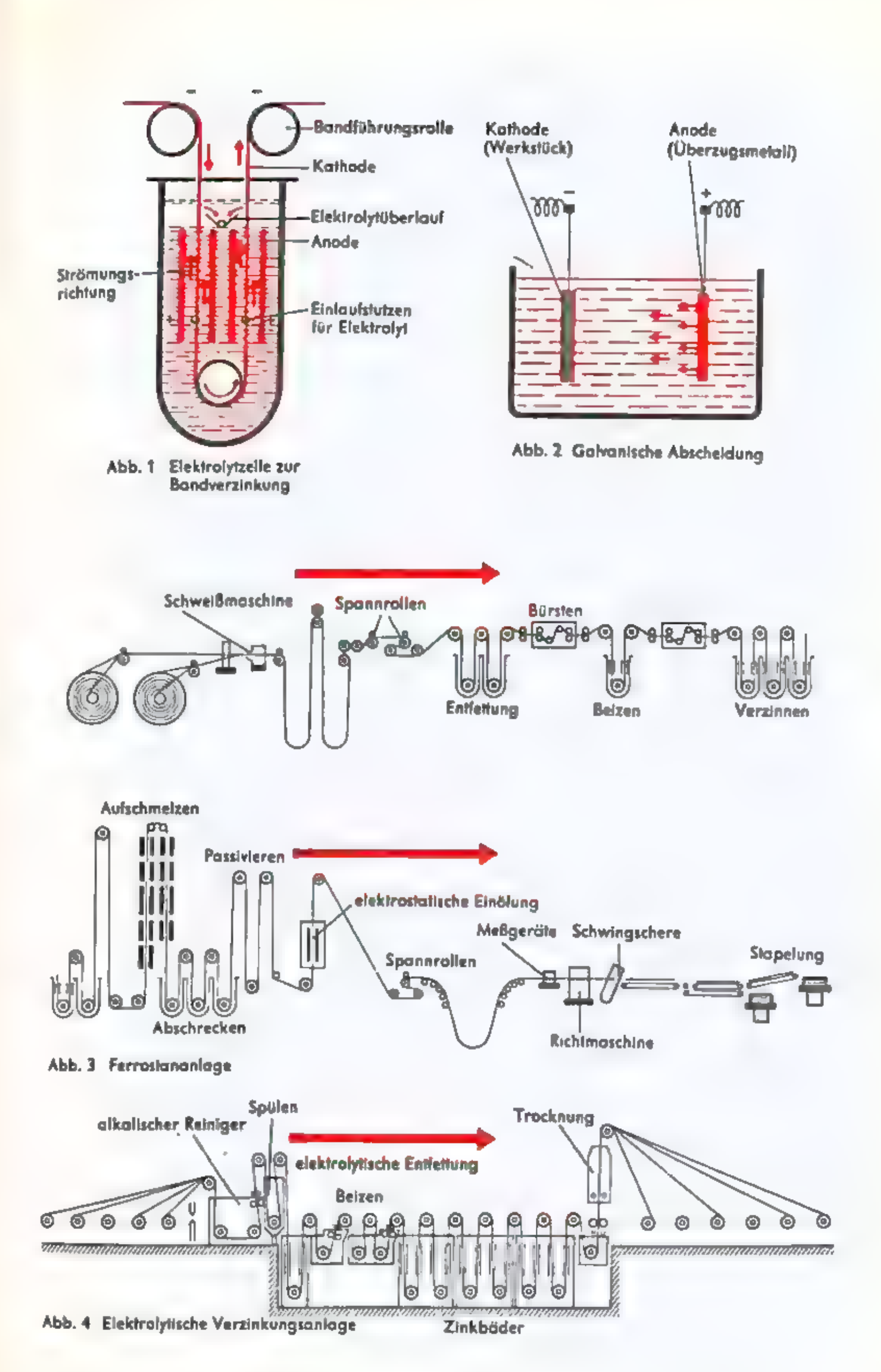


Abb. 1 Elektrolytzelle zur Bandverzinkung

Abb. 2 Galvanische Abscheidung

Abb. 3 Ferrostananlage

Abb. 4 Elektrolytische Verzinkungsanlage

WALZWERK I

Im Walzwerk werden Blöcke (Stahlstücke mit quadratischem Querschnitt) und Brammen (Stahlstücke mit rechteckigem Querschnitt) ausgewalzt, d. h., ihre Länge wird auf Kosten ihrer Höhe vergrößert. Die glühenden Stahlblöcke werden zwischen zwei sich drehende Walzen aus Gußeisen oder Stahlguß geschoben, deren kleinster Abstand voneinander kleiner ist als die Dicke des Blocks. Im Ständer werden Ober- und Unterwalze gesondert angetrieben. Dies geschieht oft von *einem* Elektromotor aus, jedoch teilt sich der Antrieb der einzelnen Walzen in einem vorgeschalteten Zahnradgetriebe. Durch Verstellen der oberen Walze (Abb. 1) wird die Stärke des gewalzten Stückes bestimmt. Die über Rollen herangeführten Blöcke oder Brammen werden von dem Walzenpaar erfaßt. Die dabei entstehende Reibung zwängt sie zwischen Ober- und Unterwalze hindurch, wobei sie unter gleichzeitiger Streckung auf das gewünschte Maß gebracht werden. Die Walzen können sehr verschiedenartig ausgebildet sein (zur Herstellung von Blechen z. B. sind sie glatt). Die zur Blechherstellung verwendeten Brammen (in kleineren Abmessungen heißen sie auch Platinen) werden breitgewalzt. Natürlich kann man aus einer großen Bramme nicht durch einmaliges Walzen ein Blech von 2 mm Dicke herstellen. Dazu werden mehrere hintereinandergeschaltete Arbeitsgänge benötigt, d. h., man muß entweder das Werkstück immer wieder durch die gleichen Walzen schicken, deren Abstand voneinander dann jedesmal geändert wird, oder man baut sehr viele solcher Walzenpaare hintereinander und erhält dann eine Walzenstraße. Dabei wird ein langes Werkstück auch gleichzeitig von zwei oder drei Walzenpaaren bearbeitet. Für die Herstellung von Profileisen werden die Blöcke, nachdem sie vorgewalzt sind, von Kalibrierwalzen bearbeitet (Abb. 2a–2c). Bei ihnen läßt die Form der Ober- und Unterwalze schon das Profil des zu walzenden Stückes erkennen. L-, I-, V-Eisen und andere Profile (Abb. 3) werden auf diese Weise hergestellt.

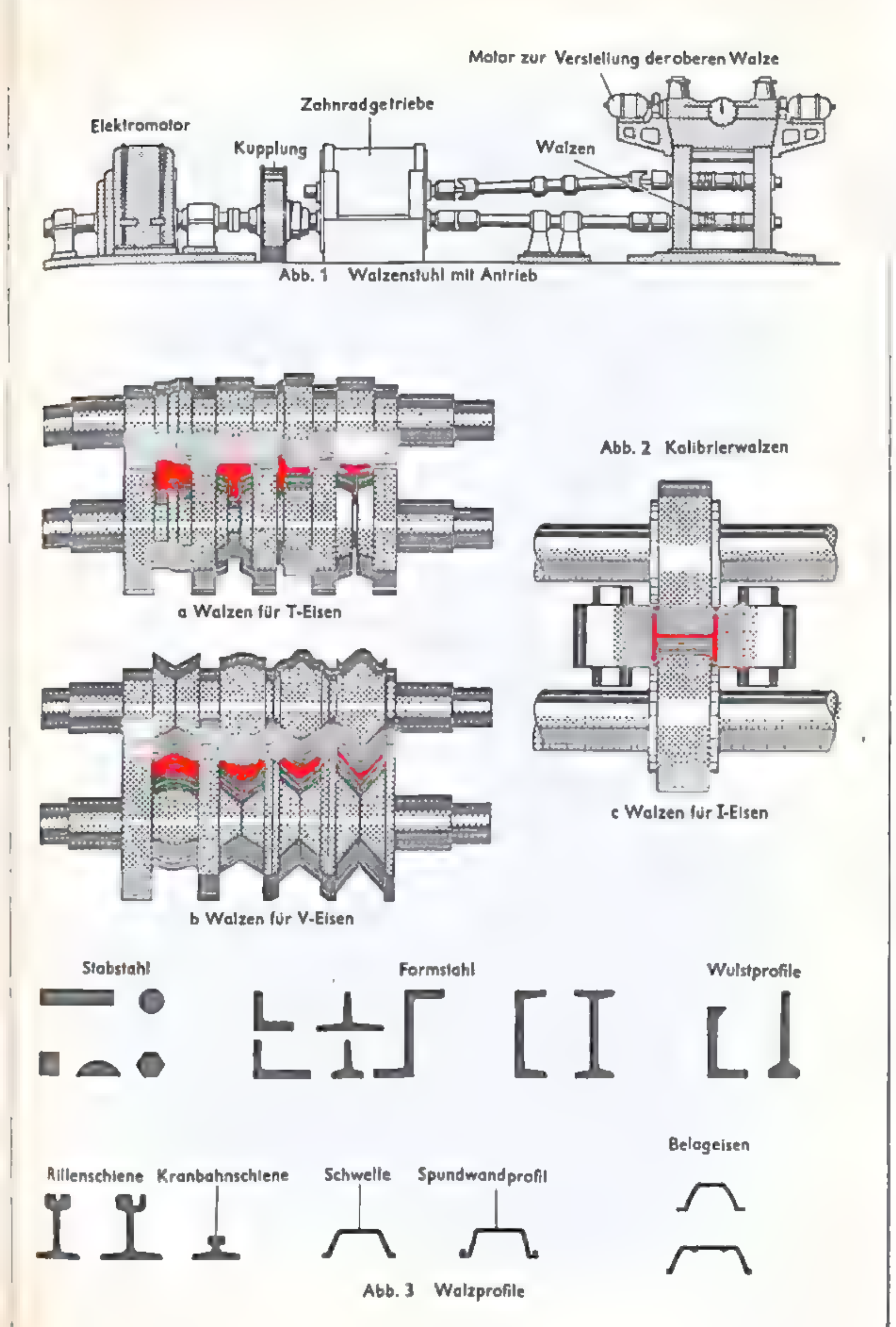


Abb. 1 Walzenstuhl mit Antrieb

Abb. 2 Kalibrierwalzen

Abb. 3 Walzprofile

WALZWERK II (ROHRHERSTELLUNG)

In der Technik werden sowohl „geschweißte" wie „nahtlose" Rohre verwandt. Geschweißte Rohre werden aus Stahlbändern unterschiedlicher Breite oder Dicke, nahtlose Rohre aus gegossenen oder gewalzten Rundblöcken bei Walztemperatur hergestellt. Für beide Herstellungsarten werden je nach Durchmesser und Wandstärke eine Vielzahl von Verfahren angewandt.

Das älteste kontinuierliche Rohrschweißverfahren ist das *Fretz-Moon-Verfahren*, ein „Feuerschweißverfahren". Hierbei wird ein endloses Stahlband (die einzelnen zu Bunden aufgerollten Bandstücke werden aneinandergeschweißt) durch einen Ofen geführt, dabei auf ca. 1400°C erhitzt und im Anschluß hieran zwischen Biegewalzen zu einem Rohr („Schlitzrohr"; Abb. 1) gebogen; schließlich werden zwischen den Schweißwalzen die Bandkanten so fest aufeinandergepreßt, daß sie miteinander verschweißen. Bei den anderen Rohrschweißverfahren bleibt das Band kalt, nur die Längskanten werden auf Schweißtemperatur erhitzt. In jedem Falle wird zunächst ein „Schlitzrohr" geformt. Es werden sowohl das elektrische *Lichtbogenschweißverfahren* (Ellira, Unterpulverschweißen) als auch das *Induktions-* und das *Widerstandsschweißverfahren* angewandt. Bei den beiden letzten Verfahren wird die elektrische Induktion bzw. der Widerstand zur Erhitzung der Nahtkanten benutzt. Eine Sonderstellung nimmt das *Spiralrohrverfahren* ein, bei dem keine Längsschweißnaht ausgeführt, sondern das Band spiralförmig gewickelt wird, so daß praktisch eine endlose spiralförmige Schweißnaht entsteht.

Beim ältesten Verfahren zur Herstellung nahtloser Rohre, dem *Schrägwalz-Pilgerschritt-Verfahren*, wird ein Rundblock zwischen zwei schräg zueinanderstehende ballige Walzen gestoßen (Abb. 2). Beide Schrägwalzen sind im gleichen Drehsinne angetrieben, wodurch eine Friemelbewegung entsteht, die zur Folge hat, daß der Kern des Blockes aufreißt. Durch die Öffnung wird ein Dorn zum Glätten und Aufweiten gestoßen. Die so entstandene dickwandige Rohrluppe wird auf dem *Pilgerschrittwalzwerk* gestreckt (Abb. 3), und zwar so, daß die Rohrluppe auf einem Dorn durch ein Walzenpaar gestoßen wird, dessen Kaliberöffnung je nach Stellung der Walzen verschieden groß ist. Wie die Abb. zeigt, „beißt" das enge Kaliber einen Teil der Rohrluppe ab und streckt ihn über dem Dorn aus, der dabei zurückläuft. Nach einer halben Umdrehung öffnet sich das Kaliber wieder und der Dorn wird wieder vorgeschoben. Diese Hin- und Herbewegung (Pilgerschritt) wiederholt sich so lange, bis die ganze Luppe das Walzenpaar passiert hat.

Beim *Stiefel-* oder *Stopfenwalzverfahren* wird ein Rundblock zunächst ebenfalls auf einem Schrägwalzwerk gelocht. Die Luppe wird dann auf einem Duo-(Zweiwalzen-)Walzgerüst mit gleichbleibendem Rundkaliber über einem Stopfen gestreckt (Abb. 4).

Beim *Stoßbank-(Ehrhardt-)Verfahren* wird ein auf Walztemperatur erhitzter Vierkantblock auf einer Lochpresse zu einer fingerhutförmigen Luppe verformt. Diese Luppe wird anschließend auf einem Schrägwalzwerk gestreckt und schließlich durch mehrere hintereinanderliegende, immer enger werdende Vierrollenkäfige gestoßen (Stoßbank, Abb. 5).

Das modernste Verfahren schließlich ist das *Strangpreßverfahren*, bei dem ein Stahlrohr dadurch erzeugt wird, daß ein glühender kurzer Rundblock zusammen mit einem Lochdorn durch eine Matrize gepreßt wird; so wird ein fertiges Rohr in einem Arbeitsgang erzeugt.

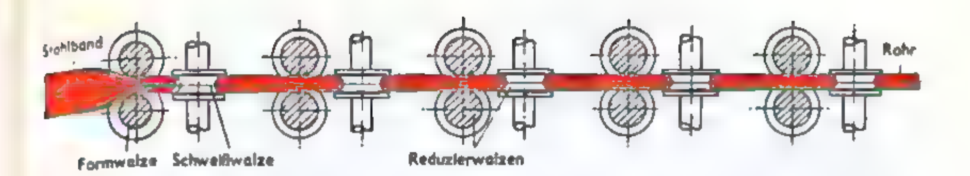
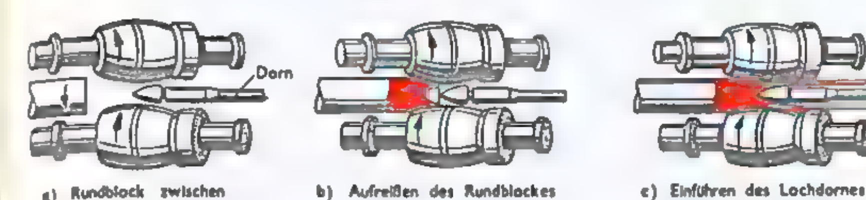


Abb. 1 Fretz-Moon-Verfahren zur Herstellung geschweißter Rohre



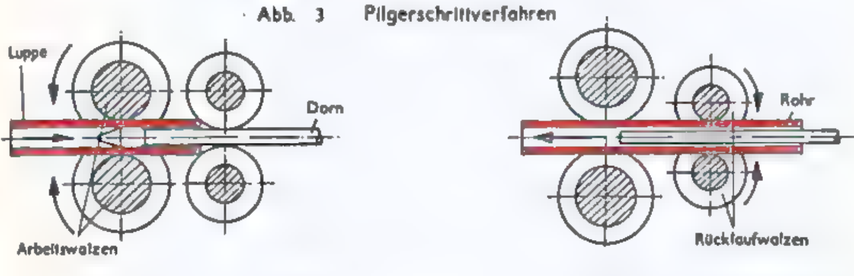
a) Rundblock zwischen Walzen geführt b) Aufreißen des Rundblockes c) Einführen des Lochdornes

Abb. 2 Schrägwalzen zur Herstellung nahtloser Rohre



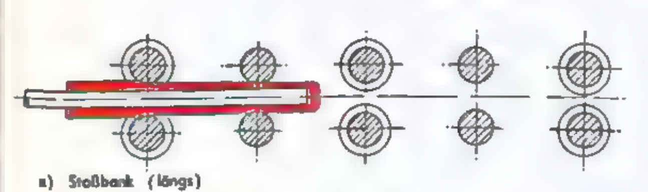
a) Vorschub der Luppe zwischen die Pilgerwalzen b) Walzen ergreifen einen Teil der Luppe c) Ausstrecken der Luppe über den Dorn, dann neuer Vorschub

Abb. 3 Pilgerschrittverfahren



a) Luppe im Duo über Dorn gestreckt b) Zurücknehmen des fertigen Rohres

Abb. 4 Stopfenwalzverfahren



a) Stoßbank (längs) b) Walzen im Rollenkäfig (quer)



Abb. 5 Stoßbankverfahren

KUNSTSTOFFVERARBEITUNG I

Die Eigenschaften der Kunststoffe sowie die verschiedenen Anforderungen, die an die entsprechenden Fertigprodukte gestellt werden, führten zu einer Vielzahl von Formgebungsmethoden. Die verarbeitende Industrie bezieht vom Produzenten das fertig rezeptierte Ausgangsmaterial, das Polymere also mit den erforderlichen Zusätzen (den eigentlichen Kunststoff), oder aber nur das Basismaterial, das Polymere. Ist letzteres der Fall, so muß der Verarbeiter dem Endprodukt gemäß dem Polymeren vor der Formgebung Hilfsstoffe zusetzen, nämlich Stabilisatoren, Farbstoffe, Weichmacher und Füllstoffe. Das homogene Vermischen der pulverförmigen Materialien geschieht chargenweise in Rührapparaten oder Mischtrommeln. Handelt es sich um plastizierbares Material, arbeitet man mit Knetern oder Mischwalzwerken (Abb. 1). Die Walzwerke bestehen aus einem Walzenstuhl mit zwei gegenläufig rotierenden, heiz- bzw. kühlbaren Walzen. Das in den Walzenspalt gelangende Material wird durchgemischt; das fertig gemischte Produkt, als Walzfell oder Walzpuppe bezeichnet, gelangt sodann zur Weiterverarbeitung (Abb. 1). Kontinuierlich läßt sich das Vermischen in Extrudern vornehmen, die zusätzlich den Vorteil einer Filtrierung des Kunststoffes vor der Weiterverarbeitung bieten (Abb. 4).

Die drucklose Herstellung von Formteilen und Stücken erfolgt durch Gießen, Formgebung unter Druckanwendung geschieht am einfachsten durch Pressen (Abb. 2), das sich sowohl für Duroplaste (Kondensationsharze) wie für Thermoplaste eignet. Das Material wird als Pulver oder Tablette in die Preßform gegeben. Beim Warmpressen werden die Formen beheizt, beim Schlagpressen wird vorgewärmtes Material eingesetzt. Auf Etagenpressen werden Schichtstoffe (Papier- oder Textilbahnen) mit härtbaren Kunststoffen getränkt, und auch Faserplatten (Phenoplaste mit Holzspänen als Füllstoff) hergestellt. Rationeller als durch Pressen lassen sich Formteile durch Spritzgießen herstellen (Abb. 5), da Vorwärmung, Plastizierung und Formgebung von einem Aggregat vorgenommen wird. Für den Spritzguß eignen sich ausschließlich leicht fließende Thermoplaste. Über einen Fülltrichter gelangt das Granulat in den Zylinder, in dem es über den Erweichungspunkt durch Heizmanschetten aufgeheizt wird. Ein beweglicher Kolben plastiziert das Material und preßt es durch eine Düse in die Form, aus der nach dem Erkalten der gespritzte Formteil entnommen wird. Verwendet man anstelle des Kolbens eine Schnecke, so läßt sich die Plastizierwirkung erhöhen (Abb. 6).

Neben der Herstellung von Fertigteilen durch den Spritzguß werden vielfach auch Halbzeuge – Folien, Platten, Stäbe oder Rohre – durch geeignete Bearbeitung in die gewünschte Endform gebracht. So wendet man die Umformung oder die spanabhebende Verarbeitung an, wenn die Stückzahlen gering sind oder komplizierte Formen benötigt werden. Während sich duroplastische Kunststoffe nur spanabhebend durch Fräsen, Drehen, Schneiden und Bohren bearbeiten lassen, können thermoplastische Kunststoffe auch umgeformt oder auch geschweißt werden. Die Warmverformung von Platten kann durch Biegen oder Ziehen erfolgen (Abb. 3). Beim Ziehen wird das Halbzeug eingespannt, erwärmt, geformt, der Formteil abgekühlt und ausgespannt. Soll die Wandstärke gleichbleiben, so muß die Halterung federnd sein; beim Streckformen verringert sich die Wandstärke. Das Umformen durch das Vakuumverfahren hat in letzter Zeit an Bedeutung gewonnen.

Beim Negativverfahren wird die aufgeheizte Kunststoffplatte auf eine konkave Form gelegt und aufgeheizt. Bohrungen in der Form ermöglichen das Absaugen von Luft, wodurch die Platte in die Form gezogen wird. Für kompliziertere Teile wird die Platte mechanisch vorgestreckt, bevor die eigentliche Negativverformung erfolgt.



Abb. 1 Mischen auf dem Walzwerk

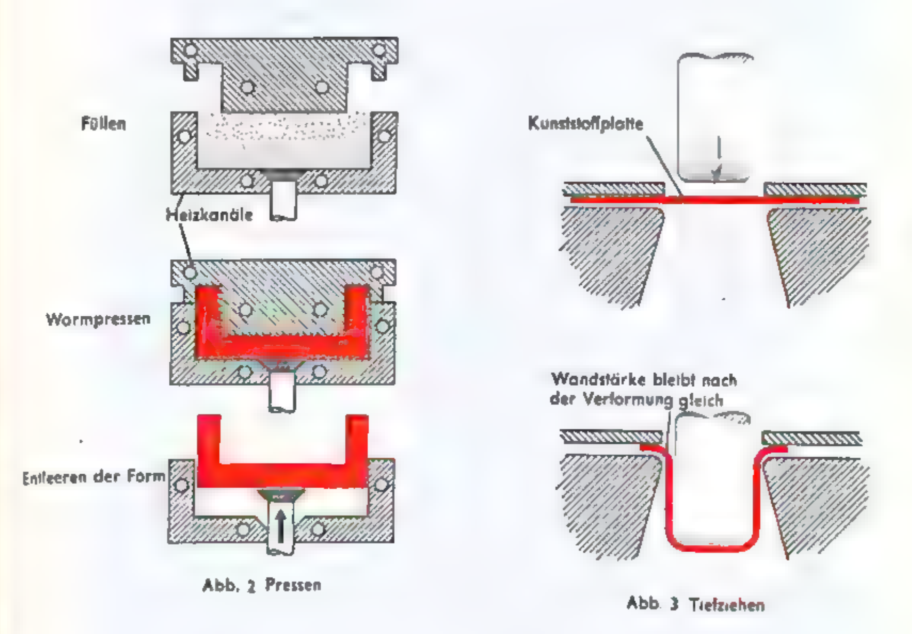


Abb. 2 Pressen

Abb. 3 Tiefziehen

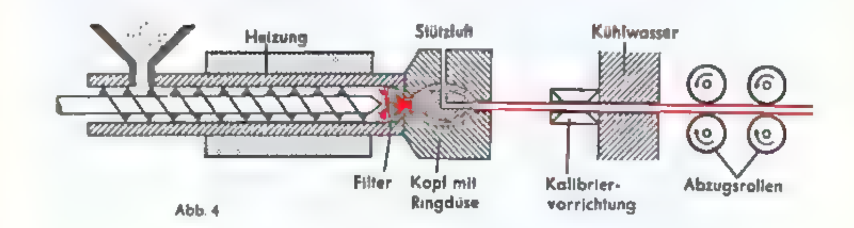


Abb. 4

KUNSTSTOFFVERARBEITUNG II

Man kann auch ein konvexes Modell verwenden, wobei man dann von Positivverformung spricht. Die vorgeheizte Platte wird über der Form vorgestreckt und vorgeformt. Durch Absaugen der Luft erhält man wiederum die gewünschte Form (Abb. 8 und 9).

Der Herstellung von Endlosprodukten, wie Profilen, Bändern, Folien und Platten dienen die Extruder, auch Strang- oder Schneckenpressen genannt (Abb. 4 und 6). Bei den Extrudern rotiert in einem Zylinder eine Schnecke um die Längsachse, die das eingefüllte Material durch die Aufwärmzone fördert, plastiziert und durch eine Düse von der Form des gewünschten Produkts kontinuierlich ausstößt. Je nach Art der Düse mit entsprechenden Einrichtungen lassen sich Folien (Blasspritzkopf) blasen, Bahnen und Platten (Breitschlitzdüse) sowie Hohl- und Vollprofile (Schlauchspritzkopf) herstellen. Mit Schrägspritzköpfen lassen sich Kabel und Drähte ummanteln. Das extrudierte Material wird gekühlt und mittels entsprechender Vorrichtungen abgezogen, die derart beschaffen sein müssen, daß keine nachträgliche Verformung erfolgen kann.

Für die Produktion großer Mengen an Folien oder dünnen Platten werden Folienziehkalander verwendet (Abb. 7). Die von einem Walz- oder Knetwerk anlangenden Kunststoffpuppen werden auf den Walzenspalt des Kalanders gegeben, einer Maschine, bei der mehrere heizbare Zylinderwalzen in achsparalleler Anordnung sich gegenläufig bewegen und dabei den Kunststoff ausbreiten und auf die gewünschte Stärke auseinanderziehen. Die letzte Walze glättet die Folie. Soll die Folie eine Oberflächenstruktur (etwa Holzmaserung) aufweisen, so erhält die letzte Walze eine Prägung, oder aber man erwärmt die Folie neuerlich und führt sie durch einen Prägekalander. Dem Kalander nachgeschaltet sind je nach Stärke der Folie eine oder mehrere Kühltrommeln. Zuletzt wird die fertige Folie aufgewickelt.

Ein weites Anwendungsgebiet ist das Überziehen eines Trägermaterials mit Kunststoffen, etwa aus Gründen der elektrischen Isolierung, als Korrosionsschutz, Schutz gegen Feuchtigkeit und Chemikalien, zur Herstellung wasserundurchlässiger Materialien und auch zur Erhöhung mechanischer Widerstandsfähigkeit. Textilgewebe, Papier und Pappe, Mauerwerk, Beton und Metalle lassen sich mit Kunststoffen überziehen. Die Beschichtung von Textilbahnen, aber auch Folien, geschieht mit kontinuierlich arbeitenden Streichmaschinen (Abb. 10). Ein Streichmesser, Rakel genannt, sorgt für die gleichmäßige Verteilung des Streichmaterials (in Form von Lösungen, Emulsionen und Dispersionen in Wasser oder organischem Medium) auf der über Walzen vorbeigeführten Trägerbahn. Anschließend erfolgt Trocknung. Die Belegung des Trägers kann auch mit einer Folie erfolgen; dann spricht man von Kaschieren.

Komplizierter geformte Metallgegenstände werden mittels des Wirbelsinterverfahrens mit dem Kunststoff beschichtet. In eine aus feinem Kunststoffpulver bestehende Wirbelschicht wird der über die Schmelztemperatur des Kunststoffs erhitzte Gegenstand gebracht. Dabei sintert der Kunststoff zu einem festen Belag auf dem Metall zusammen.

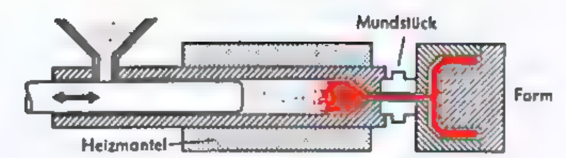


Abb. 5 Spritzgießen mit Kolben

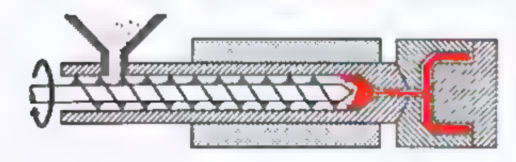

Abb. 6 Spritzgießen mit Schnecke



Abb. 7 Folienziehkalander

Abb. 10 Beschichten

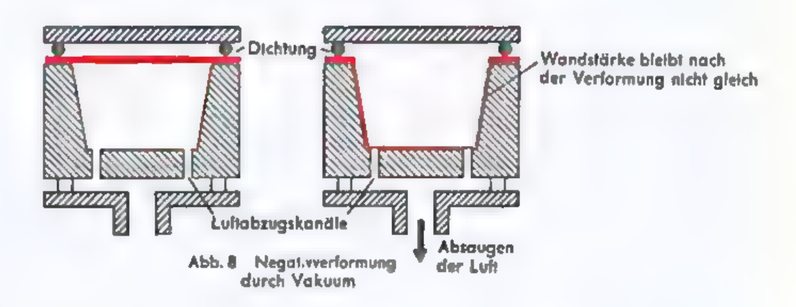


Abb. 8 Negativverformung durch Vakuum



Abb. 9 Positivverformung durch Vakuum

KUPPLUNGEN

Kupplungen sind Bauelemente zur Verbindung hauptsächlich von Wellen. Sie können fest oder beweglich, starr oder elastisch, ein- oder ausrückbar, ja sogar steuerbar sein. Je nach ihrer Bauart können sie dabei eventuell radiale, axiale und/oder winklige Wellenverlagerungen ausgleichen, Schwingungen und Drehmomentenstöße dämpfen, bei Überlastung die Verbindung zwischen den beiden Wellen unterbrechen, in manchen Fällen auch die Verbindung nur bei Gleichlauf beider Wellen herstellen, diese aber auch lösen, wenn die treibende Welle langsamer umläuft als die getriebene. Feste Kupplungen können nur Wellen verbinden, die genau fluchten. Sie übertragen das Drehmoment ungedämpft und werden vorwiegend zur Kupplung einzelner Wellenstücke zu langen Wellensträngen (z. B. Transmissionswellen, Kranfahrwerkswellen u. dgl.) verwendet. Bei der zu diesem Typ gehörenden Scheibenkupplung (Abb. 1) werden zwei Scheiben mit ihrer Nabe auf die zu kuppelnden Wellenenden, die verschiedenen Durchmesser haben können, aufgeschoben, mit einer Paßfeder oder einem Keil verdrehfest gemacht und durch Paßschrauben so fest verschraubt, daß der entstehende Reibschluß das Drehmoment übertragen kann. Die Schalenkupplung (Abb. 2) ist leichter aus- und einzubauen, da die beiden Schalen von außen auf die fluchtenden Wellenenden durch Schrauben festgeklemmt werden können. Hier überträgt der zwischen den Schalen und den Wellenenden auftretende Reibschluß das Drehmoment. Bei der Stirnverzahnung (Hirth-Verzahnung) (Abb. 3) ist es dagegen der Formschluß zwischen den radial verlaufenden Zähnen, die durch in den hohlen Teilen sitzende Schrauben axial und zentrisch verspannt werden. Bewegliche Kupplungen erlauben den Ausgleich von Wellenverlagerungen. Die Klauenkupplung (Abb. 4) ist eine Ausdehnungskupplung, kann sie doch Längenänderungen der beiden zu kuppelnden Wellen, hervorgerufen z. B. durch Erwärmung oder durch Ungenauigkeiten beim Zusammenbau, ausgleichen, da die klauenförmig ausgebildeten Kupplungshälften das Drehmoment auch noch übertragen, wenn sie in gewissen Grenzen in Längsrichtung der Wellen auseinandergeschoben werden. Macht man die Kupplungshälfte auf dem einen Wellenstrang längsverschieblich (durch eine Paßfeder und Nut), so ist die Klauenkupplung auch ausrückbar, wenn man die Klauen der beiden Hälften außer Eingriff bringt. Die Oldham-Kupplung (Abb. 5) wird dann benutzt, wenn die beiden Wellen nicht genau fluchten und eine geringe parallele Versetzung gegeneinander aufweisen. Die beiden auf den Wellenenden sitzenden Teile besitzen eine Nut, die senkrecht zur Wellenachse über den ganzen Durchmesser dieser Teile verläuft. Hierin gleitet das Zwischenstück, das an seinen beiden Stirnflächen je eine Gleitfeder besitzt, die gegeneinander um 90° versetzt sind und in den Nuten der beiden Kupplungsscheiben gleiten, sofern die beiden zu verbindenden Wellen etwas parallel zueinander versetzt sind. Winklige Wellenverlagerungen gleichen Kreuz- oder Kugelgelenkkupplungen (s. S. 204) aus. Die Bogenzahn-Kupplung (Abb. 6) läßt gleichzeitig parallele, winklige und axiale Verlagerungen zwischen den beiden Wellen zu, sofern diese Abweichungen nicht zu groß sind. Die beiden auf die zu verbindenden Wellenenden aufgeschobenen Kupplungsnaben besitzen ballige Zähne, die in die Innenverzahnung einer übergeschobenen Kupplungshülse eingreifen. Dadurch ist eine allseitige Beweglichkeit möglich. Bei Längsverschiebung der Wellen gegeneinander dringen die Kupplungsnaben tiefer oder weniger tief in die Hülse ein. Bei Winkelverlagerung der einen Welle gegen die andere kann die Bogenverzahnung der einen Welle sich in der Innenverzahnung der Hülse schräg stellen. Bei Parallelverschiebung beider Wellen gegeneinander stellt sich nur die Hülse schräg, was durch die balligen Zähne ohne weiteres möglich ist.

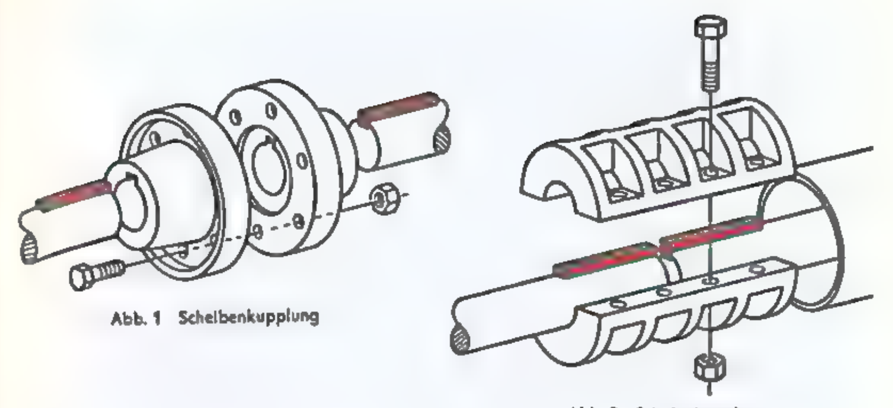
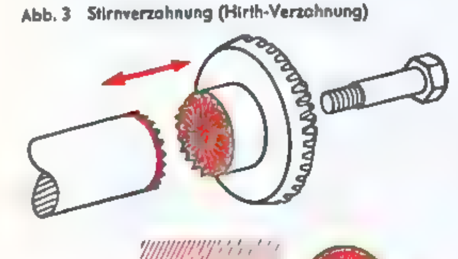
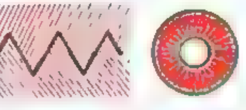


Abb. 1 Scheibenkupplung

Abb. 2 Schalenkupplung

Abb. 3 Stirnverzahnung (Hirth-Verzahnung)







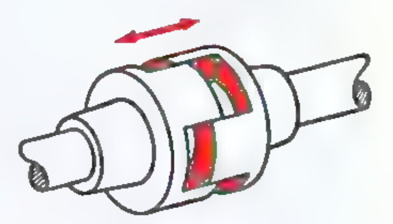


Abb. 4 Klauenkupplung

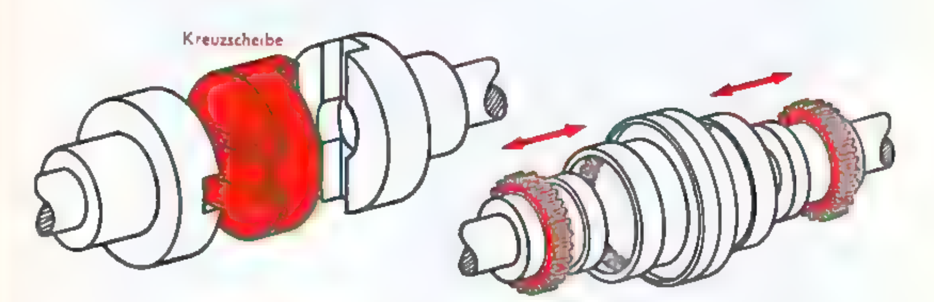


Abb. 5 Kreuzscheibenkupplung (Oldham-Kupplung)

Abb. 6 Bogenzahnkupplung

KUPPLUNGEN II

Gelenkwellen werden immer dann angewandt, wenn zwei Wellen, die entweder nicht fluchten oder die während der Drehmomentübertragung ortsveränderlich sind, miteinander verbunden werden sollen. (Z. B. Verbindung von Wechsel- und Achsgetriebe im Kraftfahrzeug, Antrieb eines Fräsmaschinentisches u. dgl.) Sie bestehen aus der Antriebs- und der Abtriebswelle, die durch zwei Einzelgelenke und eine Zwischenwelle miteinander verbunden sind (Abb. 1). Häufig ist diese Zwischenwelle als ausziehbare Teleskopwelle ausgebildet, so daß auch ein Längenausgleich ermöglicht wird. Die beiden winkelbeweglichen Gelenke, sogenannte Kardangelenke, können verschieden ausgebildet sein, ohne daß dies auf die Bewegungsverhältnisse einen entscheidenden Einfluß hat. Bei einem Kreuzgelenk, das für größere Drehmomente geeignet ist (Abb. 2), trägt jede Kupplungshälfte zwei um 180° versetzte Zapfen, die in einem gemeinsamen Ring, der vier Bohrungen an seinem Umfang trägt, so eingesetzt sind, daß die Zapfen der einen Kupplungshälfte gegenüber denen der anderen Hälfte um 90° versetzt sind. Bei einem Kugelgelenk (Abb. 3), das nur für kleinere Drehmomente verwendet wird, wird die kardanische Beweglichkeit in ganz ähnlicher Weise erreicht. Hier ist die Kugel mit vier Bohrungen am Umfang versehen, in die die jeweils 2 Zapfen jeder Kupplungshälfte eingreifen. Werden zwei Wellen durch ein einziges derartiges Kardangelenk miteinander verbunden und unter einem Winkel β gegeneinander geneigt, so entsteht bei gleichförmigem Antrieb der einen Welle an der zweiten Welle hinter dem Gelenk ein ungleichförmiger Abtrieb, d. h. die getriebene Welle wird abwechselnd beschleunigt und verzögert. Sie macht zwar bei jeder vollen Umdrehung der Antriebswelle ebenfalls eine volle Umdrehung, jedoch eilt sie dabei periodisch zweimal der Drehung der Antriebswelle voraus und zweimal bleibt sie hinter deren Drehung zurück (Abb. 4). Dies macht sich um so stärker bemerkbar, je größer der Anstellwinkel α zwischen den beiden Wellen ist. Kann diese Ungleichförmigkeit nicht in Kauf genommen werden, so müssen immer zwei kardanische Gelenke gleichzeitig, verbunden durch eine Zwischenwelle, verwendet werden. Die Bewegungsübertragung ist jedoch nur dann gleichförmig, wenn die Anstellwinkel an beiden Enden der Zwischenwelle gleich groß sind (Abb. 5), d. h. nur, wenn die Antriebs- und Abtriebswelle parallel zueinander verschoben werden. Die Zwischenwelle führt immer eine ungleichförmige Drehbewegung aus. Die Abb. 6 zeigt eine Anordnung, die gleich zwei Fehler aufweist, denn erstens ist der Winkel α nicht gleich β, zweitens müssen aber auch die an beiden Enden der Zwischenwelle sitzenden Gelenkzapfen in dieselbe Richtung zeigen, d. h. parallel stehen, denn nur dann kann die Bewegungsübertragung zwischen Eingangs- und Ausgangswelle gleichförmig sein. Bei Kardanwellen, deren Mittelteil ausziehbar ist, muß beim Zusammenbau unbedingt auf richtige Zapfenlage geachtet werden. Zur Übertragung kleiner Kräfte zwischen beliebig angeordneten Wellen (z. B. Tachometerwelle) können auch biegsame Wellen aus einem schraubenfederartig gewundenen Stahldraht, der in einer mehrfachen Drahtummantelung oder in einem Lederschlauch eingebettet ist, dienen.

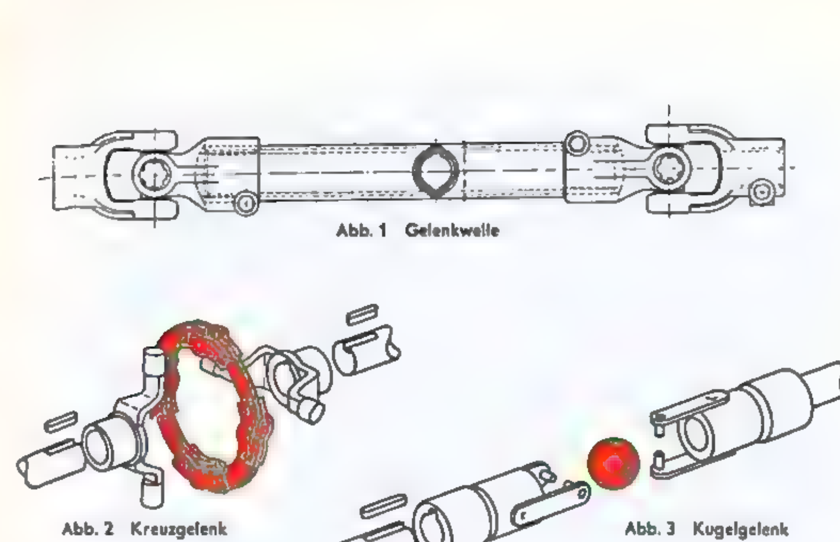


Abb. 1 Gelenkwelle

Abb. 2 Kreuzgelenk

Abb. 3 Kugelgelenk

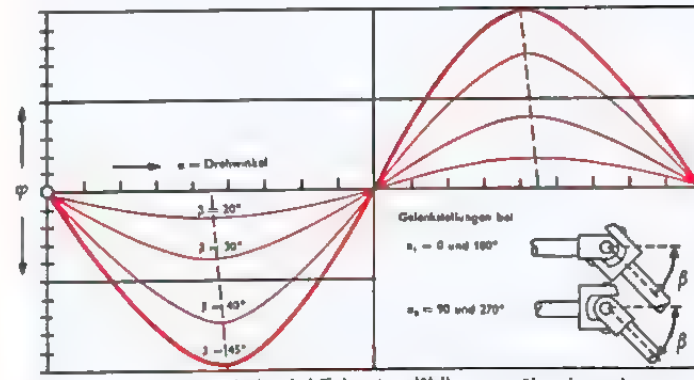


Abb. 4 Vor- und Nacheilwinkel φ der einen Welle gegenüber der anderen

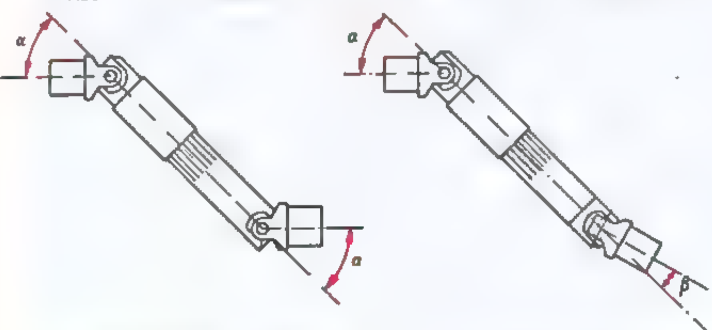


Abb. 5 Richtiger Einbau einer Kardanwelle

Abb. 6 Falscher Einbau einer Kardanwelle

WÄLZLAGER I

Durch Wälzlager werden zwei Maschinenteile, die sich relativ zueinander bewegen, gegeneinander abgestützt. Dabei wird die Relativbewegung unter gleichzeitiger Kraftübertragung durch Wälzkörper vermittelt, die zwischen zwei Laufbahnen abrollen.

Ein Wälzlager besteht normalerweise aus zwei Laufbahnträgern (Ringe bzw. Scheiben), den Wälzkörpern und dem Käfig. Die Laufbahnen sind entsprechend der Wälzkörperform so ausgebildet, daß sich sämtliche Wälz- und Drehachsen möglichst in einem Punkt schneiden und damit reine Wälzbewegung ohne zusätzliche Gleitbewegungen erzielt wird. Unter bestimmten Voraussetzungen für die Gegenstücke (Härte, Oberflächengüte) können beide Lagerringe oder einer wegfallen und die Wälzkörper unmittelbar auf der Welle oder in der Gehäusebohrung abrollen. Als Wälzkörper werden Kugeln und Rollen (Zylinder-, Tonnen-, Kegelrollen, Nadeln) verwendet. Der Käfig hat die Aufgabe, die Wälzkörper zueinander in gleichem Abstand zu halten, so ein gegenseitiges Berühren zu verhindern und die Wälzkörper bei zerlegbaren Lagern in einem der Lagerringe festzuhalten, um die Montage zu erleichtern. Teilweise übernimmt der Käfig auch die Führung der Wälzkörper.

Wälzlager zeichnen sich durch geringe Reibungsverluste (s. S. 14 ff.), vor allem durch eine niedrige Anlaufreibung, aus; damit kann mit ihrer Hilfe Antriebsenergie eingespart werden. Weitere Merkmale sind: lange Lebensdauer bei einfacher Wartung und geringem Schmierstoffverbrauch, praktisch kein Verschleiß, Möglichkeit des schnellen Ein- und Ausbaus bei weitgehender Austauschbarkeit.

Wälzlager werden normalerweise als einbaufertige Einheiten geliefert. Ihre äußeren Abmessungen und die zulässigen Toleranzen sind für handelsübliche Ausführungen international festgelegt. Nicht genormt sind die inneren Abmessungen (Anzahl und Größe der Wälzkörper, Laufbahndurchmesser usw.), jedoch bestehen meist keine wesentlichen Unterschiede zwischen Lagern verschiedener Herkunft. Wälzlager werden vorwiegend mit zylindrischer Bohrung gefertigt, zur Befestigung unmittelbar auf kegeligen Wellenzapfen bzw. auf Spann- oder Abziehhülsen aber auch mit kegeliger Bohrung.

Bauarten

Unterschiedliche Aufgaben und Anforderungen haben zur Entwicklung der verschiedenen Wälzlagerbauarten geführt. Grundsätzlich unterscheidet man nach der Form der Wälzkörper zwischen Kugel- und Rollenlagern und je nachdem, ob die Lager vorwiegend senkrecht zur Achse gerichtete Belastungen (Radialbelastungen) oder Belastungen in Längsrichtung der Achse (Axialbelastungen) aufnehmen können, zwischen Radial- und Axiallagern. Viele Lagerarten eignen sich in einem bestimmten, durch die spezielle Bauform bedingten Maße für die Aufnahme kombinierter Radial- und Axialbelastungen. Um bei gleichbleibendem Außendurchmesser höhere Tragfähigkeit zu erreichen, wurden aus den einreihigen Radiallagern die zweireihigen Ausführungen entwickelt und für wechselnde Belastungsrichtungen bei Axiallagern die zweiseitig wirkenden Bauarten. Weitere Unterscheidungsmerkmale sind die Winkelbeweglichkeit und die Verbindung der Lagerteile (selbsthaltende und nicht selbsthaltende Lager). Bei winkelbeweglichen Lagern können die Drehachsen von Außen- und Innenringen einen Winkel miteinander bilden, ohne daß dadurch zusätzliche Belastungen im Lager hervorgerufen werden (Beispiel: Pendelrollenlager); bei einem nicht selbsthaltenden Lager kann ein Lagerring oder beide von dem durch den Käfig zusammengehaltenen Wälzkörpersatz abgenommen werden (Beispiel: Zylinderrollenlager).

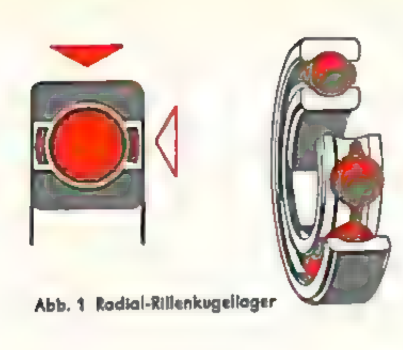
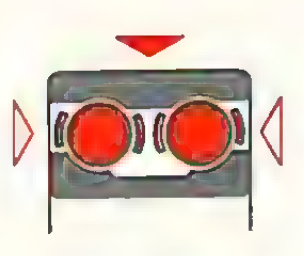


Abb. 1 Radial-Rillenkugellager



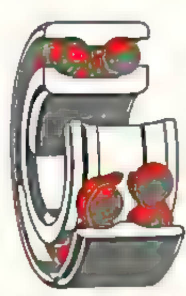


Abb. 2 Zweireihiges Schrägkugellager

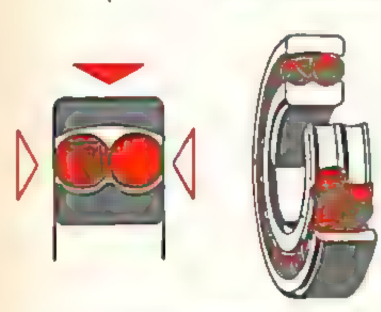




Abb. 3 Pendelkugellager



Abb. 4 Zylinderrollenlager



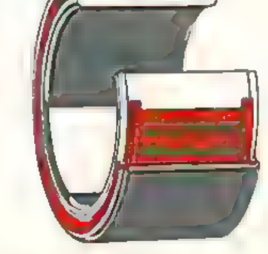


Abb. 5 Nadellager

WÄLZLAGER II

Radiallager:

Rillenkugellager (Abb. 1, S. 207) sind die am häufigsten verwendete Lagerart und für radiale und auch axiale Belastungen, selbst bei hohen Drehzahlen, geeignet. *Schrägkugellager* (Abb. 2, S. 207) sind axial tragfähiger als Rillenkugellager. Bei radialer Belastung muß das einreihige Schrägkugellager stets gegen ein zweites Lager angestellt werden. Sonderbauformen sind die sogenannten Drei- bzw. Vierpunktlager zur Aufnahme von Axialbelastungen in beiden Richtungen. *Schulterkugellager* haben nur eine Schulter und einen zylindrischen Laufbahnteil im Außenring. Dadurch wird eine geringe axiale Verschiebung im Lager ermöglicht. Der Außenring kann abgezogen und getrennt eingebaut werden. *Pendelkugellager* (Abb. 3, S. 207) sind infolge der hohlkugeligen Laufbahn im Außenring unempfindlich gegen Durchbiegungen der Welle oder Fluchtfehler der Gehäusebohrungen. *Zylinderrollenlager* (Abb. 4, S. 207) eignen sich für relativ große Radialbelastung und hohe Drehzahlen und sind je nach Bauform überhaupt nicht oder nur beschränkt axial belastbar. Als nicht selbsthaltende Lager ermöglichen sie leichten Ein- und Ausbau. *Nadellager* (Abb. 5, S. 207), eine Art Zylinderrollenlager mit verhältnismäßig langen und dünnen Wälzkörpern, zeichnen sich durch einen geringen Raumbedarf in radialer Richtung aus. Bei Nadelkränzen (ohne Laufringe) oder Nadelhülsen (mit gehärteter Stahlhülse als äußerem Laufring) ist die Bauhöhe noch geringer. *Pendelrollenlager* (Abb. 6) sind ebenfalls winkelbeweglich und können außer großen Radial- auch Axialbelastungen in beiden Richtungen aufnehmen. *Kegelrollenlager* (Abb. 7) sind für gleichzeitig auftretende große Radial- und Axialbelastungen geeignet. Diese Lager müssen ähnlich wie das Schrägkugellager gegen ein zweites Lager angestellt werden. *Tonnenlager* eignen sich für große, stoßartige Radialbelastungen, sind winkelbeweglich und daher gegen Wellendurchbiegungen und Fluchtfehler unempfindlich; die axiale Tragfähigkeit ist gering.

Axiallager:

Axial-Rillenkugellager (Abb. 8) können nur Axialkräfte aufnehmen und werden hauptsächlich dort eingesetzt, wo eine starre axiale Führung der Welle notwendig und die Drehzahl nicht zu hoch ist. *Axial-Schrägkugellager* sind aufgrund der schräg zur Lagerachse verlaufenden Druckrichtung für höhere Drehzahlen geeignet. *Axial-Pendelrollenlager* (Abb. 9) können zum Unterschied von Axiallagern anderer Bauart neben großen Axial- auch Radialbelastungen aufnehmen und sind infolge der hohlkugeligen Laufbahn der Gehäusescheibe winkelbeweglich.
Axial-Zylinderrollenlager, *Axial-Nadellager*, *Axial-Kegelrollenlager:* Da eine oder beide Laufbahnen eben ausgebildet sind, können sich beide Scheiben radial geringfügig gegeneinander verschieben und einen eventuellen Achsenversatz zwischen Welle und Gehäusebohrung ausgleichen. Wegen der teilweise ungünstigen Abrollverhältnisse sind diese Lagerarten für hohe Drehzahlen nicht geeignet.
Eine Sonderform des Wälzlagers ist das *Drahtwälzlager*, das als Kugel- und als Rollenlager gebaut wird. Bei dieser Bauart rollen die Wälzkörper auf gehärteten Federstahldrähten ab, die in Stützringe aus ungehärtetem Stahl, Leichtmetall, Kunststoff oder Buntmetall eingebettet sind.

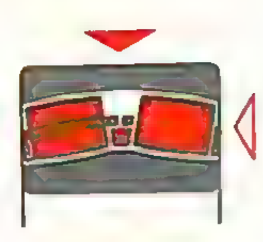



Abb. 6 Pendelrollenlager

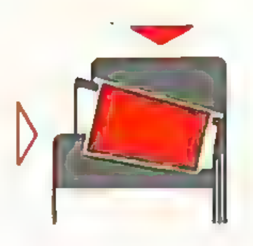



Abb. 7 Kegelrollenlager

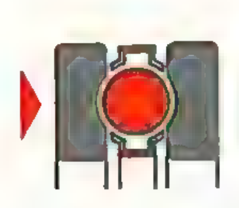
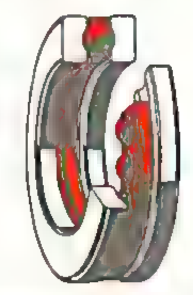



Abb. 8 Einseitig wirkendes Axial-Rillenkugellager

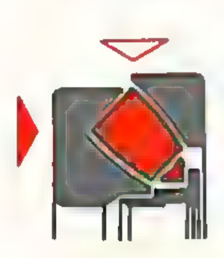
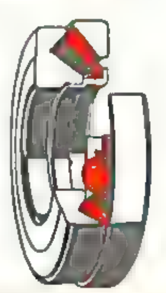



Abb. 9 Axial-Pendelrollenlager

MECHANISCHE GETRIEBE

Mechanische Getriebe stellen letzten Endes die Grundbausteine dar, aus denen sich eine Maschine zusammensetzt. Es sind Vorrichtungen, mit denen bestimmte Wirkungen unter bestimmten Bewegungen ausgeübt werden können. Jedes Getriebe (oder Mechanismus) besteht aus einzelnen Getriebegliedern, deren Bewegung untereinander zwangsläufig ist, d.h. die Bewegung eines Gliedes erzeugt eine genau bestimmbare und festlegbare Bewegung jedes einzelnen Punktes der anderen Getriebeglieder. Trotzdem lassen sich alle derartigen Mechanismen auf sechs Grundformen zurückführen, die nach ihrem typischen Glied benannt werden. Jedes Glied kann dabei feststehend, d. h. zum sogenannten Gestell gemacht werden. Hierdurch und bei wahlweisem Antrieb der beweglichen Glieder sowie durch Veränderung der Abmessungen der Getriebeglieder ergeben sich unendlich viele Möglichkeiten.

1. Schraubengetriebe (s. Abb. 1). Bei Drehung der Schraube (bzw. Spindel) wird das mit der Mutter verbundene Bauelement in Längsrichtung der Schraube verschoben. (Beispiel: Schraubstock, Drehbanksupport, Fräsmaschinentisch.) Wird die Mutter drehbar im Gestell gelagert und angetrieben, so wird die Spindel in Längsrichtung verschoben (Beispiel: Wagenheber).

2. Kurbelgetriebe (Abb. 2) sind durch ein Getriebeglied, die Kurbel, gekennzeichnet, das am Gestell beweglich ist und meist umlaufen kann. Die Bewegung der Kurbel wird durch die Koppel auf die im Gestell drehbar gelagerte Schwinge übertragen. Statt der Schwinge besitzt das Schubkurbelgetriebe einen im Gestell beweglichen Gleitkörper. Die Koppel wird dann Schub- oder Pleuelstange genannt (Beispiel: Kurbeltrieb bestehend aus Kolben, Zylinder, Pleuelstange, Kurbelwelle im Verbrennungsmotor).

3. Rädergetriebe (Abb. 3) übertragen Drehbewegungen von einer Welle auf eine andere meist unter Veränderung von Drehzahl und Drehmoment. Beim Zahngetriebe sind die Übertragungsglieder Zahnräder, beim Reibgetriebe liegen die Getriebeglieder an der Berührungsstelle mit so starker Pressung aufeinander, daß die entstehende Reibungskraft den Kraftschluß herstellt.

4. Beim Rollengetriebe (Abb. 4) oder Zugmittelgetriebe sind die Drehglieder durch biegsame Zugmittel (Bänder, Seile, Riemen) miteinander verbunden.

5. Beim Kurvengetriebe wird fast immer eine im Gestell gelagerte Kurvenscheibe angetrieben und bewegt dadurch einen ebenfalls im Gestell gelagerten Hebel oder Schieber nach einem durch die Form der Kurvenscheibe festgelegten Bewegungsgesetz (Beispiel: Ventilsteuerung in der Verbrennungskraftmaschine); Abb. 5.

6. Sperrgetriebe sollen eine im Getriebe vorhandene Kraft immer dann, wenn es gewünscht wird, aufhalten, überwinden oder zu geregelter Wirkung kommen lassen. In manchen Fällen sollen sie eine absatzweise Bewegung am Abtriebsglied erzeugen, manchmal aber auch eine Bewegung vollkommen sperren (Abb. 6).

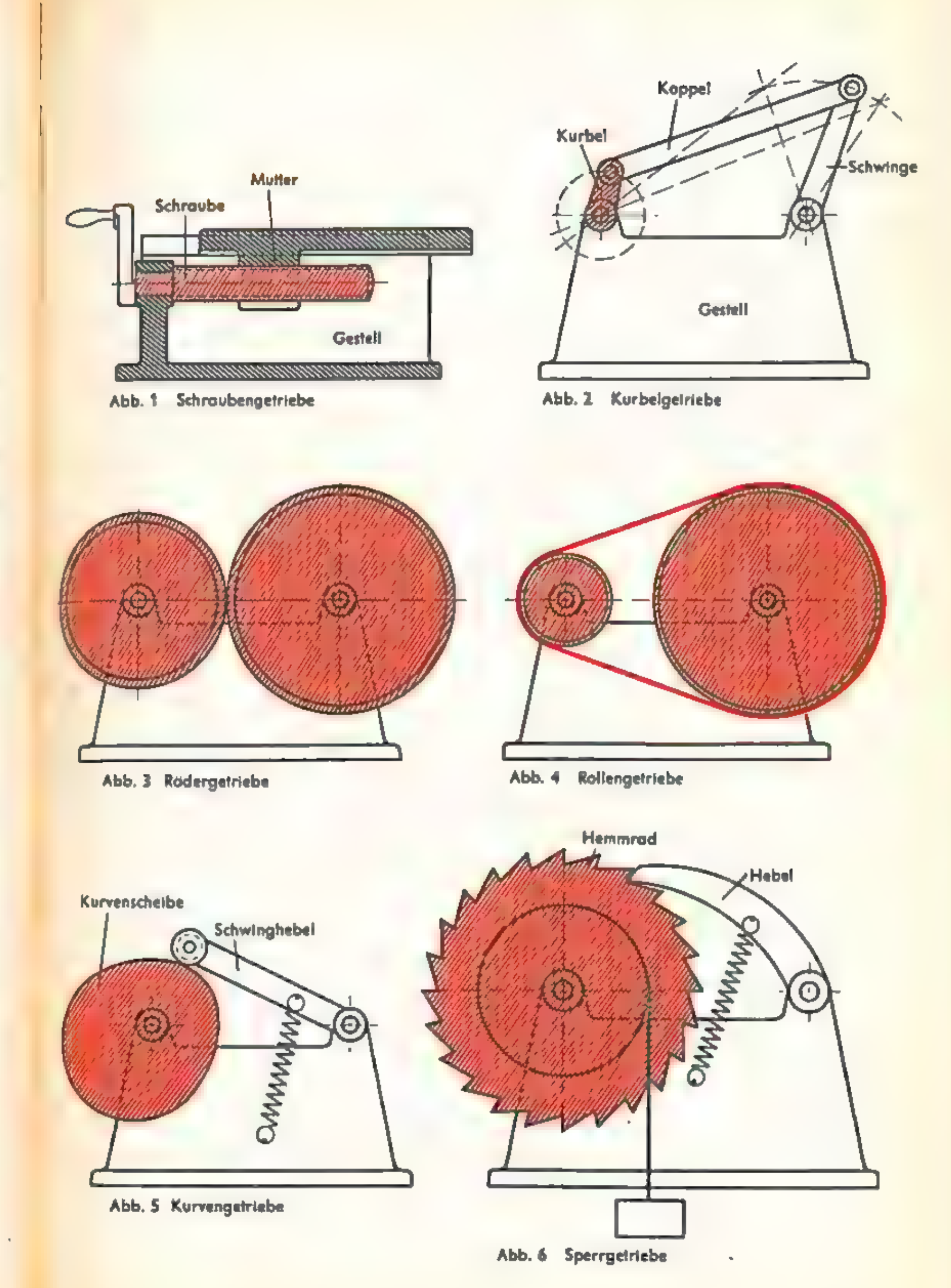


Abb. 1 Schraubengetriebe

Abb. 2 Kurbelgetriebe

Abb. 3 Rädergetriebe

Abb. 4 Rollengetriebe

Abb. 5 Kurvengetriebe

Abb. 6 Sperrgetriebe

KURBELGETRIEBE

Grundlage jedes Kurbelgetriebes ist das Gelenkviereck (Abb. 1), bestehend aus vier Gliedern, die durch vier Gelenke miteinander verbunden sind. Es hängt davon ab, welche Abmessungen die einzelnen Glieder haben und welches der vier Glieder zum feststehenden Glied, zum sogenannten Gestell gemacht wird, ob einzelne Glieder volle Umläufe oder nur Schwingbewegungen ausführen. Stellt man z. B. in Abb. 1 das unterste Glied (Gestell) fest, so kann sich das im Gestell gelagerte kurze Glied um 360° drehen (man nennt es deshalb die Kurbel), während das der Kurbel gegenüberliegende und mit dieser durch die Koppel verbundene Glied, die Schwinge, nur um seinen Drehpunkt im Gestell hin- und herschwingt. Die Schwingungsausschläge werden dabei um so kleiner, je kürzer die Kurbel gemacht wird. Es bietet sich so die Möglichkeit, einen Mechanismus zu bauen, bei dem während des Betriebs die Kurbellänge verstellt werden kann. Wird wie in Abb. 2 die Schwinge mit der Abtriebswelle durch ein Gesperre oder Freilauf verbunden, so daß diese nur in einer Drehrichtung angetrieben wird, so erhält man zwischen Antriebs- und Abtriebswelle verschiedene Übersetzungen, je nachdem, wie weit der Punkt A in Richtung auf O_1 verschoben wird. Der Mechanismus stellt dann ein stufenloses Getriebe dar. Bei Verschiebung von A bis in O_1 erfolgt dabei sogar Stillstand der Schwinge und damit der Abtriebswelle.
Wird das kürzeste Glied des Viergelenkecks zum Gestell gemacht (Abb. 3), so entsteht die Dopppelkurbel. Gleichförmiger Antrieb der einen Kurbel erzeugt ungleichförmigen an der anderen Kurbel. Ein Sonderfall dieser Doppelkurbel ist die Parallelkurbel. Sie entsteht wenn einerseits Gestell und Koppel und andererseits die beiden Kurbeln gleiche Länge haben und die beiden Kurbeln gleichen Drehsinn haben (Abb. 4). Bei gegenläufigem Drehsinn beider Kurbeln nennt man sie Antiparallelkurbel (Abb. 5) Bei der Zeichenmaschine bewirken zwei Parallelkurbeltriebe Parallelführung der Zeichenlineale in jeder Lage (Abb. 6), beim Werkzeugkasten (Abb. 7) werden sie ähnlich angewendet.

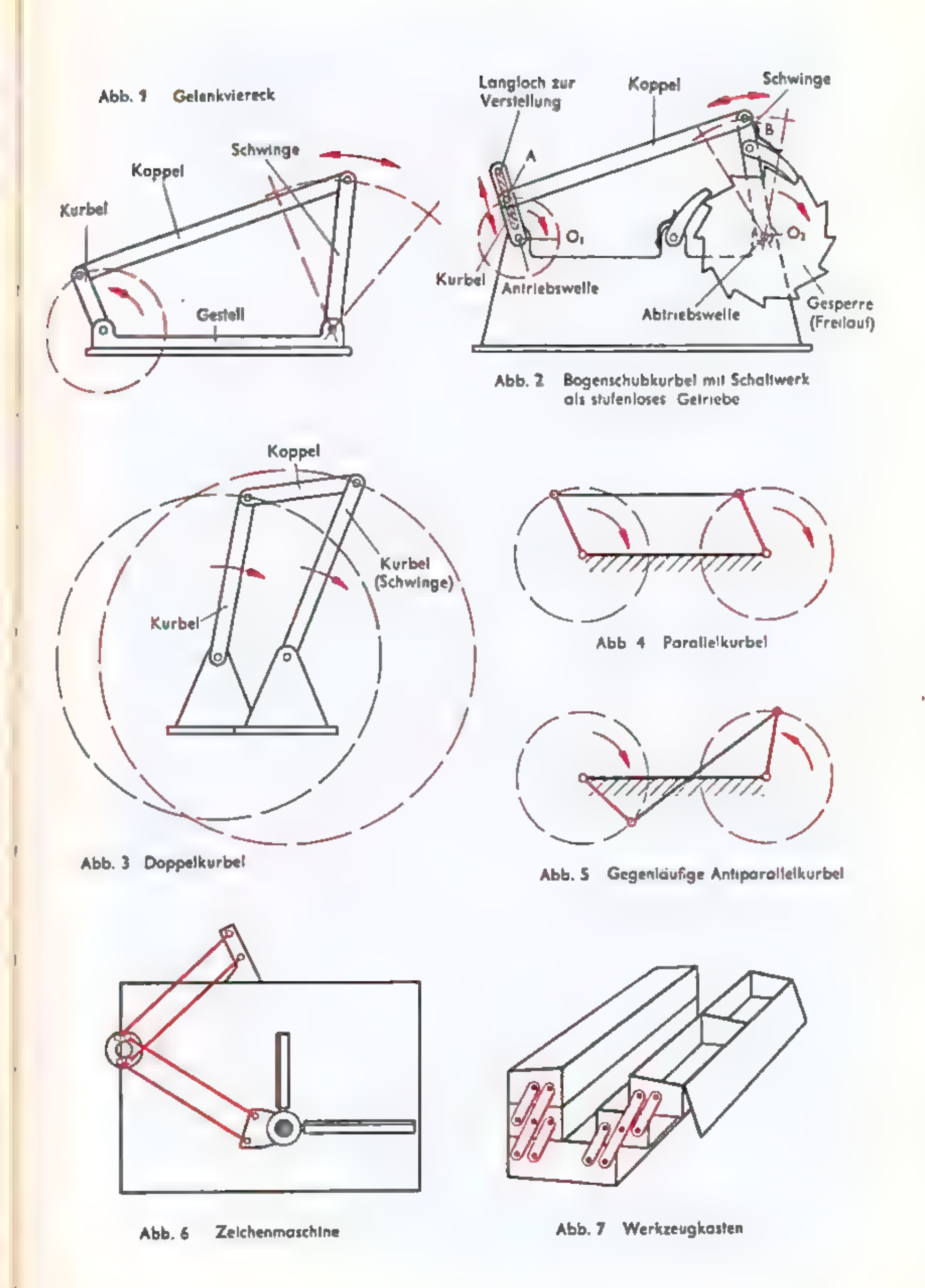


Abb. 1 Gelenkviereck

Abb. 2 Bogenschubkurbel mit Schaltwerk als stufenloses Getriebe

Abb. 3 Doppelkurbel

Abb 4 Parallelkurbel

Abb. 5 Gegenläufige Antiparallelkurbel

Abb. 6 Zeichenmaschine

Abb. 7 Werkzeugkasten

RÄDERGETRIEBE

Zahnradgetriebe übertragen die Drehbewegung einer Welle auf eine andere durch verzahnte Grundkörper. Meistens erfolgt dabei gleichzeitig eine Wandlung des Drehmomentes. Die Bewegungs- und Kraftübertragung ist schlupflos und besitzt einen guten Wirkungsgrad. Das einfachste Getriebe besteht aus zwei miteinander kämmenden Zahnrädern (Abb. 1), die in einem Steg oder Gehäuse gelagert sind. Da die Zähne beider Räder ineinandergreifen, müssen sie gleiche Umfangsgeschwindigkeit haben. Das bedeutet, daß das kleine Rad schneller als das große Rad laufen muß. Die Drehzahlen der beiden Räder verhalten sich umgekehrt wie die beiden Durchmesser. Da nach dem Gesetz actio gleich reactio die Kraft F, die das eine Rad an der Eingriffsstelle auf das andere ausübt, gleich der Reaktionskraft F_R ist, die Kraft am kleinen Rad nur am Hebelarm = Radius r, am großen Rad aber am Hebelarm = Radius R angreift, ergibt sich am großen Rad ein größeres Drehmoment (= Kraft × Hebelarm) als am kleinen Rad. (Dafür entsteht aber am großen Rad die kleinere Drehzahl.) Das Verhältnis der Drehzahl der antreibenden Welle zur Drehzahl der getriebenen Welle nennt man das Übersetzungsverhältnis. Wird statt des Stegs ein Zahnrad festgehalten, so läuft bei Antrieb des zweiten Zahnrads der Steg um (Abb. 2). Es entsteht so ein Umlaufgetriebe (Planetengetriebe). Der Antrieb des Planetenrades (meist bringt man mehrere an) kann wie in der Abb. durch ein innenverzahntes Hohlrad erfolgen. Da drei Getriebeglieder (Sonnenrad, Planetenrad und Steg) vorhanden sind, ist es möglich, jedes der drei Glieder wahlweise festzuhalten und jeweils eins der freien Glieder anzutreiben. Es ergeben sich damit 6 verschiedene Möglichkeiten der Übersetzung (abgesehen von der Verriegelung bzw. Blockierung des ganzen Getriebes = direkter Antrieb). Ganz allgemein werden die Zahnradgetriebe nach der Form der Zahnräder, die im wesentlichen von der gegenseitigen Lage der beiden Achsen abhängt, benannt. Stirnradgetriebe verbinden parallele Achsen durch verzahnte zylindrische Grundkörper (Vollzylinder, Hohlzylinder, eventuell Zahnstange zur Erzeugung einer Längsbewegung). Kegelradgetriebe stellen die Verbindung zwischen sich schneidenden Achsen her. Die Grundkörper sind Kegel (Vollkegel, Hohlkegel, im Grenzfall ist der Kegel ein Planrad). Für sich schneidende Achsen wendet man Schraubgetriebe (Abb. 3) an, bei denen die Zähne nicht nur kämmen sondern auch in Richtung der Zahnbreite gleiten.

Beim Schneckengetriebe ist der Grundkörper für die Schnecke ein Zylinder oder ein Globoid (ein Globoid ist ein Drehkörper, der durch Drehen eines Kreisbogens um eine beliebige Achse entsteht), für das Schneckenrad ein Globoid (Abb. 4).

Schaltbare Getriebe erlauben als Wechselgetriebe mehrere Übersetzungen. Das kann im einfachsten Falle durch Umstecken von Zahnrädern erfolgen. Vorgelegegetriebe erreichen durch die Anordnung einer Vorgelegewelle, daß die Antriebs- und Abtriebswelle miteinander fluchten. Hierzu gehören die bei Drehbänken üblichen Vorgelege, aber auch die Schaltgetriebe in Kraftfahrzeugen. Ein Getriebe, das die Wahl so vieler Übersetzungen erlaubt, wie Zahnradpaare vorhanden sind, und das wenig Platz beansprucht, ist das Ziehkeilgetriebe (Abb. 5). Durch Verschieben eines Ziehkeils wird jeweils eins der auf der Welle II sonst lose sitzenden Zahnräder kraftschlüssig gemacht und damit das betreffende Zahnradpaar zur Kraftübertragung eingeschaltet. Es findet vor allem als Vorschubgetriebe bei Werkzeugmaschinen Verwendung. Wendegetriebe verändern beim Schalten nur die Drehrichtung der angetriebenen Welle. Beim Kegelrad-Wendegetriebe der Abb. 6 erfolgt der Antrieb durch die Welle I, auf der drehfest, aber längsverschiebbar der Schaltkörper mit den Klauen k sitzt.

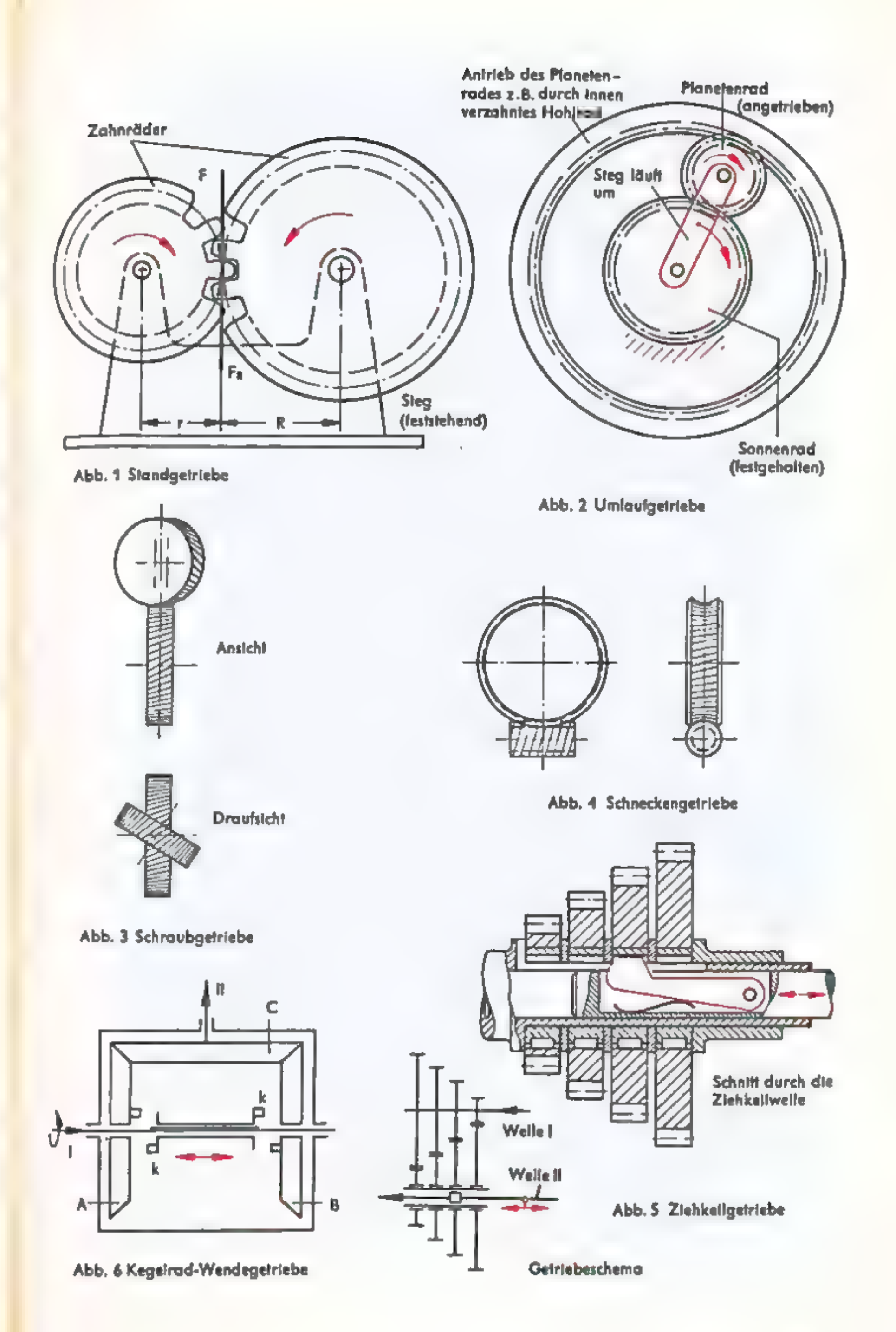


Abb. 1 Standgetriebe

Abb. 2 Umlaufgetriebe

Abb. 3 Schraubgetriebe

Abb. 4 Schneckengetriebe

Abb. 5 Ziehkeilgetriebe

Abb. 6 Kegelrad-Wendegetriebe

ROLLENGETRIEBE

Die einfachste Form eines Rollengetriebes ist die „feste Rolle" (Abb. 1), bei der ein Zugmittel unter dem Einfluß äußerer Kräfte (im Beispiel: Last Q und Zugkraft Z) kraftschlüssig wird. Der Kraftschluß überträgt dabei die Bewegung vom Zugmittel auf die Rolle und umgekehrt. Die Zugmittel (Riemen, Bänder, Seile, Schnüre, Drähte, Ketten aus den verschiedensten Werkstoffen wie Gummi, Leder, Hanf, Textilien, Stahl und dgl.) können nur auf Zug beansprucht werden. Sie stellen den Kraftschluß mit der Rolle meist durch Reibung her, sind aber auch manchmal formschlüssig (z. B. Verzahnung mit Kette: Fahrradkette oder verzahnte Keilriemen) oder unmittelbar mit der Rolle verbunden (wenn diese nur wenige Umdrehungen ausführt).
Wird wie in Abb. 2 ein Ende des Zugmittels festgehalten und dafür die Rolle ortsveränderlich gemacht, so kann eine an die Rolle gehängte Last Q durch eine halb so große Kraft, die am freien Seilende angreift, gehoben werden. Allerdings ist dabei am freien Seilende ein doppelt so langer Weg erforderlich, als an der Last erzeugt wird. Dies nutzt man beim Flaschenzug (s. S. 242) in sinnvoller Weise aus.
Für die Übertragung von Drehungen zwischen Wellen beliebiger Lage und Entfernung können zwei durch ein Zugmittel verbundene Rollen benutzt werden (Abb. 3). Durch entsprechende Verspannung des Zugmittels oder auch unter Zuhilfenahme einer dritten Rolle, einer Spannrolle, wird hierbei der Anpreßdruck des Zugmittels hergestellt. Durch keilförmigen Querschnitt des Riemens (Keilriemen) kann weiter die Anpreßkraft vergrößert und damit ein besserer Reibschluß erzeugt werden. Bei dem Rollentrieb der Abb. 3 sind die beiden kegelförmigen Teilscheiben jeder Rolle auf ihren Wellen verschiebbar, so daß der Abstand zwischen ihnen verändert werden kann. Werden sie wie bei der linken Rolle weit auseinandergefahren, so kommt das eingelegte Zugmittel bei einem kleinen wirksamen Radius zur Anlage. Bei Zusammenfahren der beiden Teilscheiben wie bei der rechten Rolle läuft das Zugmittel auf einem großen wirksamen Radius. Da die Kegelscheiben der einen Rolle durch eine Vorrichtung gegenläufig zu denen der anderen Rolle verstellt werden können, bleibt einerseits der eingelegte Keilriemen bei jeder Stellung straff gespannt, andererseits kann so das Übersetzungsverhältnis zwischen beiden Wellen stufenlos verändert werden. Beim PIV-Trieb (*p*ositive *i*nfinitely *v*ariable = zwangsläufig stufenlos verstellbar) besitzen die Kegelscheiben radial verlaufende Rillen, in die eine aus einzelnen Lamellen bestehende Kette formschlüssig eingreifen kann (die Lamellen sind seitlich verschiebbar, so daß eine Art Verzahnung je nach Breite der radialen Rille entsteht).
Abb. 4 zeigt einen Rollentrieb, der auf einfache Weise das Problem löst, eine im Betrieb verschiebbare Abtriebswelle (z. B. Antrieb der Schleifmaschine beim Flächenschleifen) von einer feststehenden Antriebswelle aus anzutreiben. Trotz Verschiebung des Abtriebs in Pfeilrichtung bleibt bei der Rollenanordnung die Länge des Zugmittels in allen Stellungen gleich, so daß die Kraftübertragung immer gewährleistet ist.
Abb. 5 zeigt die Verwendung eines Rollentriebs für spiegelbildliche Schuberzeugung (z. B. für Vorhänge, Schiebetüren und dgl.). Wenn die linke Schiebetür nach links bewegt wird, so zieht sie über das angehängte schwarze Seil und die rechte große Rolle die rechte Tür um dasselbe Maß nach rechts. Bei Bewegung der rechten Tür nach rechts, erfolgt der Antrieb der linken Tür nach links durch das rote Seil. Ebenso ist auch bei Bewegung einer Tür auf die Mitte zu immer gewährleistet, daß die andere Tür ebenfalls ihre Bewegung spiegelbildlich auf die Mitte zu ausführt. Abb. 6 zeigt die Benutzung von Rollentrieben in einem Hubwagen: Da sich bei Drehen der Antriebswelle im Uhrzeigersinn Seil aufwickelt, sich also die freie Seillänge verkürzt, führt dies zum Anheben der einzelnen Schieber; Absenken geschieht durch Abwickeln von Seil von der Antriebswelle. In ganz ähnlicher Weise geschieht auch das Aus- und Einziehen einer Feuerwehrleiter (Abb. 7).

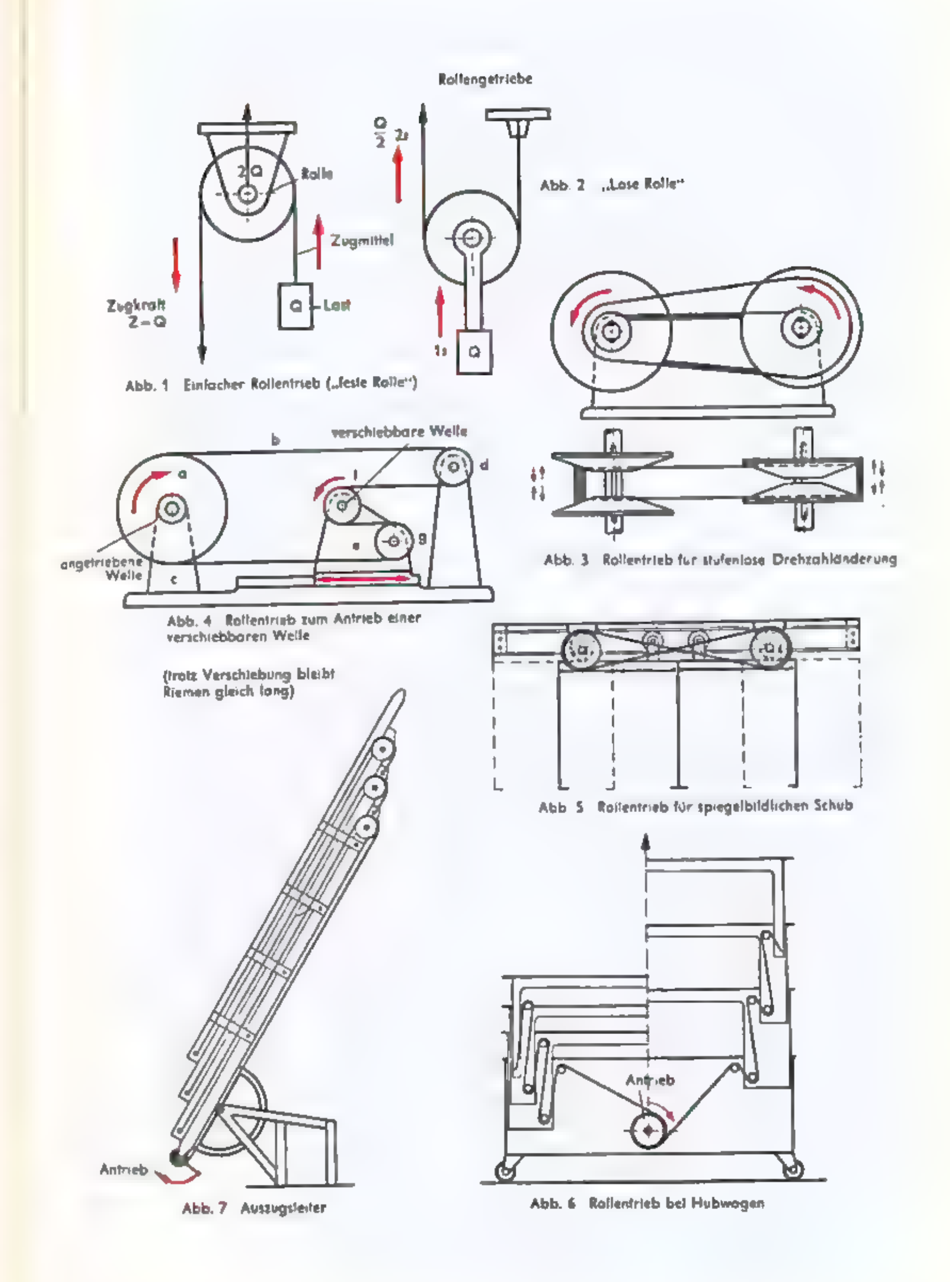


Abb. 1 Einfacher Rollentrieb („feste Rolle")

Abb. 2 „Lose Rolle"

Abb. 3 Rollentrieb für stufenlose Drehzahländerung

Abb. 4 Rollentrieb zum Antrieb einer verschiebbaren Welle (trotz Verschiebung bleibt Riemen gleich lang)

Abb. 5 Rollentrieb für spiegelbildlichen Schub

Abb. 6 Rollentrieb bei Hubwagen

Abb. 7 Auszugsleiter

ABSPERRORGANE

Absperrorgane sind handbediente oder ferngesteuerte Vorrichtungen zum Absperren oder zur Freigabe strömender Flüssigkeiten, Gase oder Dämpfe, aber auch zum Regeln der Durchflußmenge oder zum Konstanthalten eines Druckes. Sie werden nach der Schließrichtung des Dichtkörpers unterschieden: Ventile und Klappen schließen entgegen der Strömung; Schieber besitzen quer zur Strömung in geradlinigen Führungen bewegte Abschlußkörper. Hähne werden durch Drehen des Hahnkükens um seine quer zur Strömungsrichtung liegende Achse betätigt.

Ventile (Abb. 1) werden besonders für kleine Durchmesser verwendet. Das strömende Medium tritt von einer Seite in das im Gegensatz zum Hahn meist kugelförmig verdickte Gehäuse ein, wird etwas umgelenkt, fließt durch eine Öffnung, den sogenannten *Ventilsitz*, und verläßt das *Ventilgehäuse* fast immer auf der dem Eintritt gegenüberliegenden Seite (deshalb muß der abgebildete *Wasserhahn* technisch gesehen zu den Ventilen gerechnet werden). Der Ventilsitz kann durch Drehen an einem Hahnrad oder Drehgriff, wodurch sich die mit Trapezgewinde versehene Spindel auf den Sitz zu bewegt, vom daran befindlichen *Ventilkegel* verschlossen werden. Dieser kann je nach Bauart verschiedene Kegelwinkel haben. Der kegelige Sitz gewährleistet einwandfreie Führung und Zentrierung.

Beim *Nadelventil* (für kleinste Durchmesser) dichtet die Spindelspitze selbst. Beim *Kugelventil* arbeitet eine Kugel oder eine kugelig gewölbte Tellerfläche mit einer kegeligen Sitzfläche im Gehäuse zusammen. Ventile besitzen einen verhältnismäßig hohen Durchflußwiderstand. Beim *Stromlinien-* oder *Freiflußventil* (Abb. 2) ist dieser durch die Schräglage von Spindel und Sitz geringer, da die Strömung weniger umgelenkt wird als beim Normalventil. Beim *Sicherheitsventil* oder *Überdruckventil* (Abb. 3) wird der Ventilkegel durch eine Feder (oder ein Gewicht) aus den Sitz gedrückt. Bei zu großem Druck unter dem Ventilkegel öffnet dieser entgegen der Feder- oder Gewichtsbelastung. Der Öffnungsdruck ist einstellbar durch Verändern der Federspannung oder der Größe des Gewichts bzw. dessen Hebelarm.

Schieber sind wegen ihres geringeren Druckverlusts zum Absperren mittlerer und größerer Rohrleitungen geeignet. Hier verschiebt die Spindel den Schieber quer zur Strömungsrichtung, was ihn für beide Durchflußrichtungen geeignet macht, aber einen größeren Bewegungswiderstand als beim Ventil hervorruft. Nach Lage der Dichtplatten werden *Parallel-* oder *Keilschieber* (Abb. 4) unterschieden. Beim Parallelschieber wird beim Anheben der Dichtplatten an die Stelle der Rohrunterbrechung häufig ein *Leitrohr* zur Verringerung des Druckverlusts geschoben. Bei Dampfmaschinen erfolgt die Dampfsteuerung durch *Flach- oder Kolbenschieber*. Als *Muschelschieber* ist der Flachschieber besonders einfach ausgebildet. Durch seitliche Bewegung stellt er abwechselnd die Verbindung vom Zylinder zum Einlaß und zum Auslaß her. Der Kolbenschieber erfüllt dieselbe Aufgabe, ist aber durch die Ringnuten, die den Schieber allseitig mit Dampf beaufschlagen, in jeder Stellung vollständig entlastet.

Hähne erlauben das schnelle Öffnen und Schließen von Rohrleitungen durch Drehen des konusförmigen oder zylindrischen *Hahnkükens* um jeweils 90°, wodurch dessen quer zu seiner Drehachse liegende Bohrung entweder die Verbindung zwischen Ein- und Austritt herstellt oder unterbricht. Das *Küken* eines *Dreiwegehahns* besitzt drei T-förmig miteinander verbundene, um 90° versetzte Bohrungen. Da im Gehäuse drei ebenfalls um 90° versetzte Zugänge vorhanden sind, erlauben die vier möglichen, um 90° versetzten Stellungen des Kükens jede beliebige Kombination zwischen je zwei Zugängen sowie die Verbindung aller drei Zugänge miteinander.

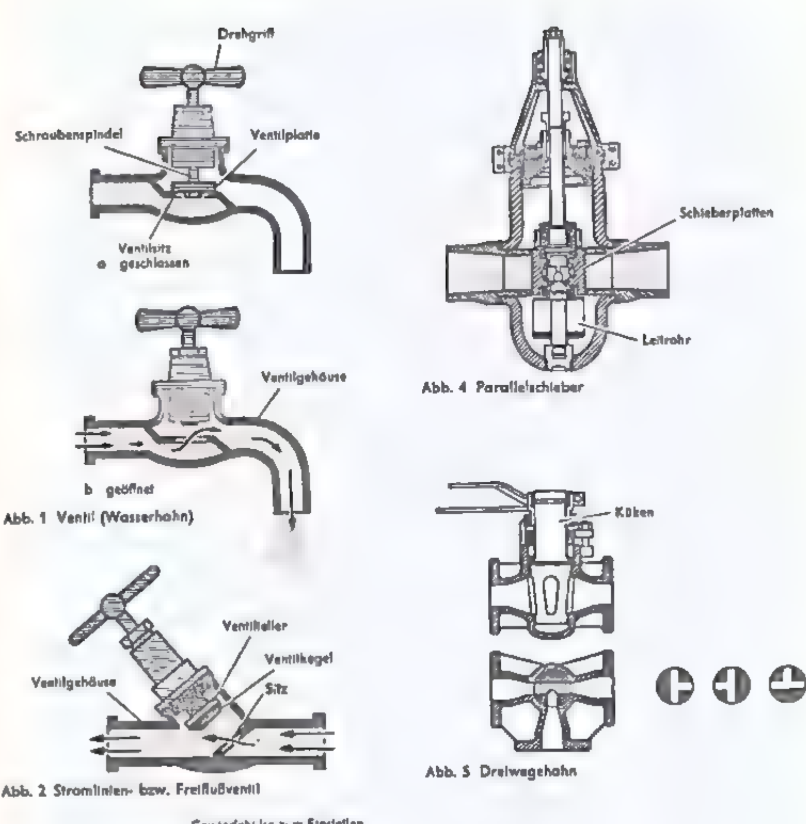


Abb. 1 Ventil (Wasserhahn)

Abb. 2 Stromlinien- bzw. Freiflußventil

Abb. 4 Parallelschieber

Abb. 5 Dreiwegehahn

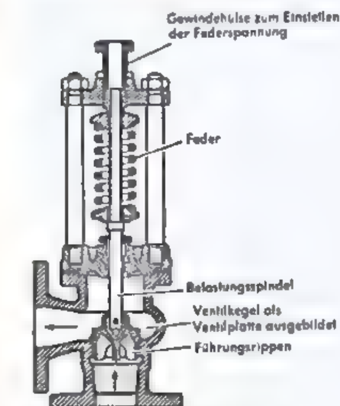


Abb. 3 Sicherheitsventil bzw. Überdruckventil

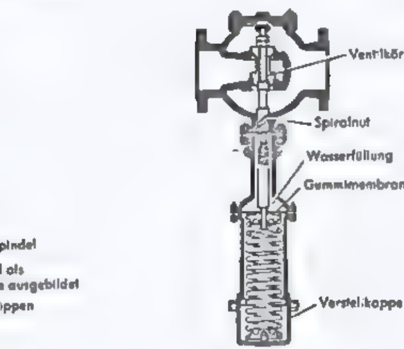


Abb. 6 Druckminderventil

WASSERTURBINE I

Wasserturbinen werden überwiegend mit elektrischen Generatoren gekoppelt und zur Erzeugung elektrischer Energie verwendet. Man unterscheidet *Aktions-* oder *Gleichdruckturbinen* und *Reaktions-* oder *Überdruckturbinen*. Bei ersteren wird in Düsen oder feststehenden Leitapparaten der größte Teil der Energie des Wassers in Geschwindigkeitsenergie (kinetische Energie) umgewandelt, so daß das Wasser mit hoher Geschwindigkeit gegen die sich drehenden Teile der Turbine strömt. Der Druck unmittelbar vor und hinter dem Laufrad der Turbine ist gleich. Bei der Reaktions- oder Überdruckturbine strömt das Wasser mit verhältnismäßig geringerer Geschwindigkeit aber mit hohem Druck in das Laufrad der Turbine ein und verläßt dieses mit geringem Restdruck. Die Leistung der Turbine ergibt sich aus der durchgesetzten Wassermenge (m^3/h oder m^3/s) und aus der Fallhöhe des Wassers (kgm/kg). Letztere ist der Höhenunterschied zwischen dem Flüssigkeitsspiegel des Sammel- oder Staubeckens und dem Austritt der Turbine.

Das Wasserrad ist der uralte Vorläufer der Turbine. Es nutzt z. B. das natürliche Gefälle eines Baches aus. Das Wasser trifft auf die Schaufeln eines großen hölzernen Rades, das meist unmittelbar mit einer Arbeitsmaschine verbunden ist. Strömt das Wasser von oben auf die Schaufeln des Wasserrades, so handelt es sich um ein oberschlächtiges Wasserrad. Trifft es (Abb. 1) auf die Schaufeln im unteren Teil des Wasserrades, so spricht man von einem unterschlächtigen Wasserrad.

Die *Pelton- oder Freistrahlturbine* (Abb. 2) ist eine Gleichdruckturbine. Das Laufrad der Peltonturbine ist meist mit waagerechter Welle angeordnet. Am Umfang des Laufrades sind becherartige, halbkugelförmige Schaufeln angebracht. Durch ein bis zwei Düsen tritt Wasser, dessen Strahl Kreisquerschnitt aufweist, tangential auf die Schaufeln. Infolge der Schneide der becherförmigen Schaufeln (Abb. 3) wird der Wasserstrahl in zwei Teilströme aufgeteilt. Die Rundung der Becher lenkt die beiden aufgeteilten Wasserstrahle nahezu um 180° um. Infolge der Zerteilung des Wasserstrahles auf die beiden Becherhälften haben die durch die Strahlumlenkung hervorgerufenen Kräfte in axialer Richtung zwar die gleiche Größe aber entgegengesetzte Wirkungsrichtung. Sie heben sich dadurch auf. Das Peltonrad weist damit keinen Axialschub auf. Im oberen Teil ist das Laufrad von einem Gehäuse umgeben, das jedoch nach unten für den Ablauf des Wassers völlig offen ist. Die Laufradwelle ist beidseitig am Gehäuse gelagert.

Das Laufrad darf nicht in das ablaufende Unterwasser eintauchen. Die Geschwindigkeit des auf die Schaufeln aufprallenden Wasserstrahles und die Wassermenge bestimmen die Leistung der Peltonturbine. Diese wird durch Veränderung des Austrittsquerschnittes der Düsen geregelt. Hierzu ist zentrisch in der Düse eine verschiebbare Nadel angeordnet, die einen zwiebelförmigen Kopf besitzt und je nach Lage einen größeren oder kleineren Kreisringquerschnitt freigibt. Wird die Belastung der Turbine plötzlich geringer, so dreht sich an jeder Düse ein Strahlablenker in den aus der Düse schießenden Wasserstrahl und teilt einen Zweigstrom ab (Abb. 4). Nun rückt die Düsennadel langsam in Richtung Düsenaustritt vor, wobei sich die ausströmende Wassermenge infolge des verkleinerten Düsenquerschnittes verringert. Gleichzeitig schwenkt der Strahlablenker in seine Ausgangslage zurück. Würde man bei einem plötzlichen Lastabfall die Düsennadel zu rasch verstellen, so entstünde in der Rohrleitung durch die plötzlich abgebremste Wassermasse ein schädlicher Druckanstieg, der sogenannte Wasserschlag. Die Bewegung der Düsennadel und das Schwenken des Strahlablenkers erfolgt selbsttätig gesteuert über hydraulische Antriebe, die mit Drucköl arbeiten. Peltonturbinen werden für Wassergefälle von 50 bis 1750 m und für Wassermengen bis 10 m^3/s gebaut.

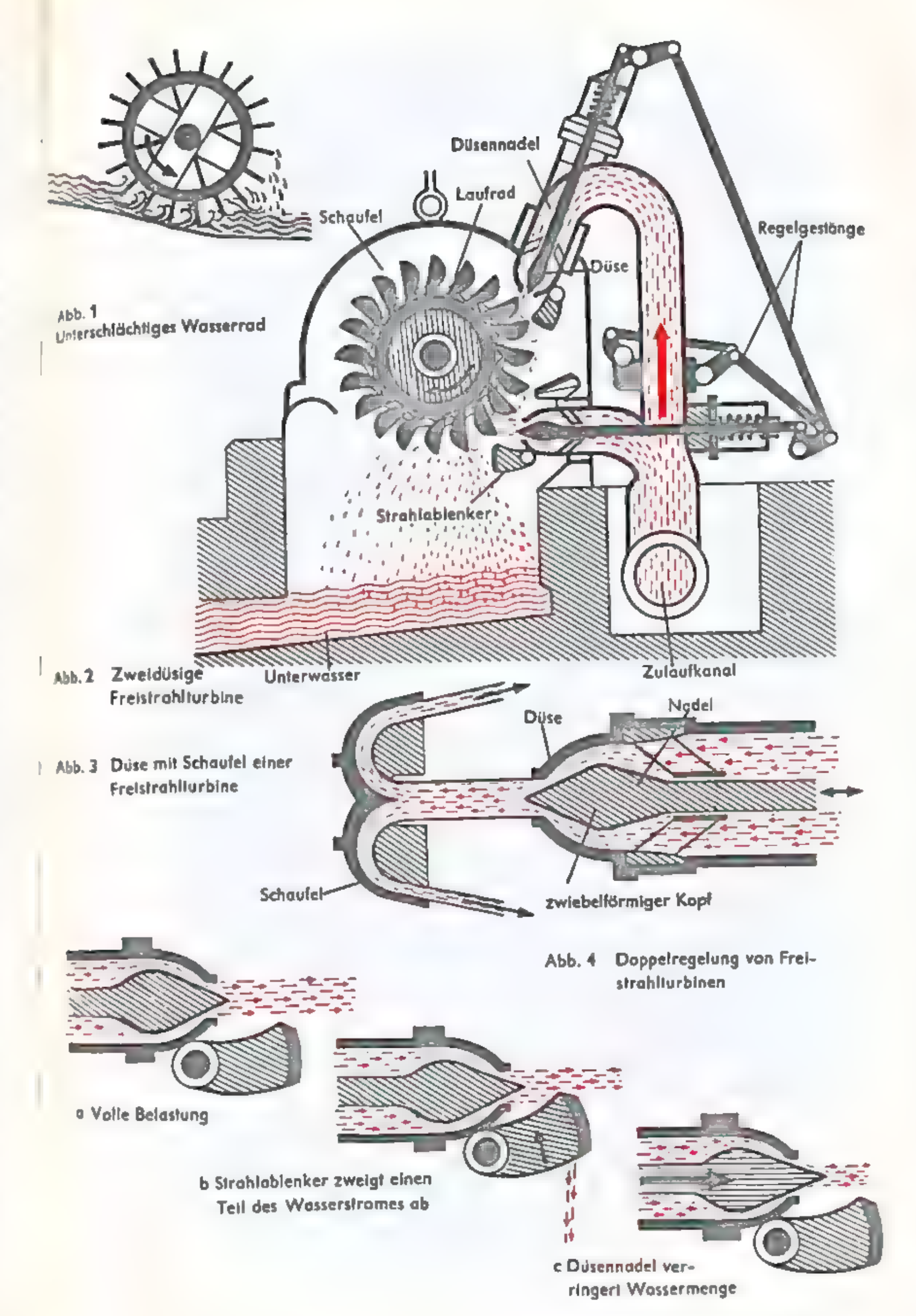


Abb. 1 Unterschlächtiges Wasserrad

Abb. 2 Zweidüsige Freistrahlturbine

Abb. 3 Düse mit Schaufel einer Freistrahlturbine

Abb. 4 Doppelregelung von Freistrahlturbinen

a Volle Belastung

b Strahlablenker zweigt einen Teil des Wasserstromes ab

c Düsennadel verringert Wassermenge

WASSERTURBINE II

Bei den *Reaktions-* oder *Überdruckturbinen* wird das unter Druck aber mit geringer Geschwindigkeit zufließende Wasser in einem dem Turbinenrad vorgeschalteten Leitapparat unter Druckabnahme beschleunigt. Der Abbau des Restdruckes und der absoluten Strömungsgeschwindigkeit des Wassers erfolgt im Laufrad.

Die *Francisturbine* ist eine Radialturbine (Abb. 1). Für niedere Gefälle (Fallhöhe des Wassers) kommt die Francisturbine mit liegendem Laufrad und stehender Welle, Schachtturbine, zur Anwendung. Das vom Wasser umgebene Turbinengehäuse schließt das Laufrad so ein, daß Wasser nur radial in die vor dem Laufrad angeordnete Leitvorrichtung einströmen kann. Das durch den Laufradboden nach oben abgedeckte waagerechte Laufrad ist kraftschlüssig mit der senkrechten Turbinenwelle verbunden. Die Laufradschaufeln sind räumlich gekrümmt. Durch die schwenkbar im feststehenden Turbinengehäuse angebrachten Leitschaufeln fließt das Wasser tangential dem drehenden Laufrad zu. Es prallt auf die am Außenrand des Laufrades radial endenden Schaufeln. Innerhalb der von den gekrümmten Laufschaufeln gebildeten Strömungskanäle wird das zunächst nach innen strömende Wasser senkrecht nach unten abgelenkt. Die zweifach umgelenkten Wassermassen üben auf die Laufradschaufeln eine Kraft aus. Da sich außerdem der Wasserdruck im Laufrad in Strömungsgeschwindigkeit umwandelt, entsteht zusätzlich eine auf die Schaufeln einwirkende Rückstoß-(Reaktions-)Kraft. Beide Kräfte ergeben die Drehkraft des Laufrades. Das Wasser, das unten aus dem Laufrad ausströmt, gelangt über ein sich stetig erweiterndes Saugrohr in das Unterwasser. Da auf dem Flüssigkeitsspiegel des Unterwassers Atmosphärendruck lastet, herrscht am Wasseraustritt des Laufrades ein Unterdruck, der die im Laufrad umgesetzte Druckenergie vergrößert.

Bei höheren Gefällen ist das Laufrad der Francisturbine stehend, die zugehörige Welle waagerecht angeordnet (Abb. 2). Das Wasser tritt in ein das Turbinenrad und die Leitvorrichtung umgebendes Spiralgehäuse ein, durchströmt den Leitapparat und das Laufrad auf die oben beschriebene Weise, wobei im Laufrad eine Drehkraft erzeugt wird und fließt über das Saugrohr zum Unterwasser ab.

Die Leitvorrichtung der Francisturbine besitzt zur Regelung des Wasserdurchflusses und damit zur Regelung der Leistung schwenkbare Leitschaufeln (Abb. 1 und 2). Diese sind mit einem Regulierring über Lenkhebel drehbar verbunden. Durch Verdrehen des Regulierringes werden die Leitschaufeln so verstellt, daß sie eine kleinere oder größere Eintrittsöffnung für das Wasser freigeben.

Für ganz kleine Fallhöhen und große Wassermengen, etwa bei Flußkraftwerken, finden u. a. die Kaplanturbinen Verwendung. Das Wasser fließt in einen meist betonierten, die Turbine spiralförmig umgebenden Kanal und durchströmt radial, von außen nach innen, einen Leitapparat. Dieser ist prinzipiell wie der der Francisturbine ausgeführt. Nach dem Leitapparat wird der Wasserstrom in einem schaufellosen Raum senkrecht nach unten hin abgelenkt und strömt axial, parallel zur senkrechten Turbinenwelle, die schräggestellten Schaufeln des waagerecht angeordneten Laufrades an. Dieses Laufrad arbeitet im umgekehrten Sinne einer Schiffsschraube. Das strömende Wasser drückt die schräggestellten Schaufeln des Laufrades zur Seite und versetzt sie so in drehende Bewegung. Das abfließende Wasser gelangt über das sich erweiternde wegen der geringen Fallhöhe gekrümmte Saugrohr (siehe oben) zum Unterwasser. Die Wassermenge und die Leistung der Turbine werden wie bei der Francisturbine durch Verdrehen der Leitschaufeln im feststehenden Leitapparat bewirkt. Um einen möglichst hohen Wirkungsgrad der Turbine zu erreichen, müssen mit den Leitschaufeln auch die Laufschaufeln des Turbinenrades verstellt werden.

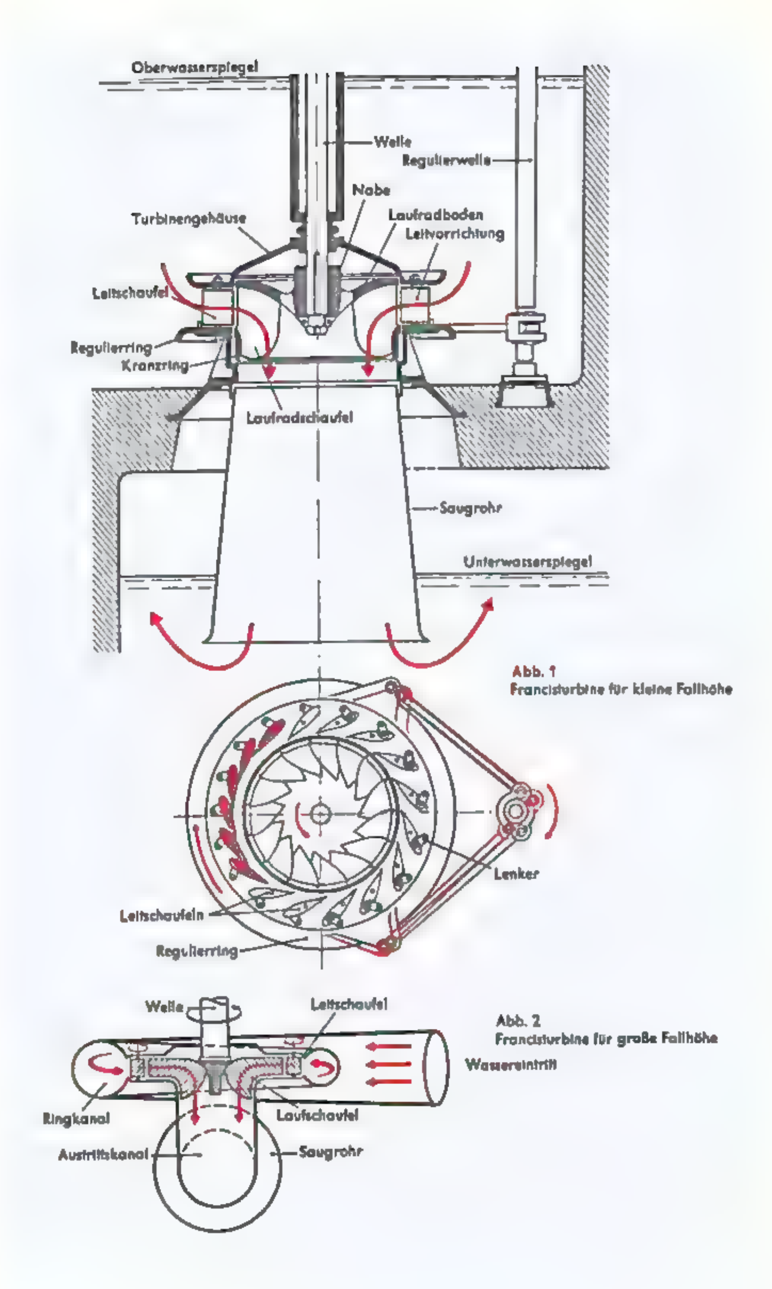


Abb. 1
Francisturbine für kleine Fallhöhe

Abb. 2
Francisturbine für große Fallhöhe

DAMPFKESSEL

In Industrieanlagen, wo große Mengen Wasserdampf mit hohem Druck für die verschiedensten Zwecke benötigt werden, verwendet man Dampfkessel, die Dampf von 12–40 atü (in Kraftwerken bis 160 atü) liefern.
Die einzelnen Bauweisen unterscheiden sich grundsätzlich durch die Art, wie die Wärme der Feuerung und der Rauchgase das Wasser zum Sieden bringt. Bei der einfachsten Art (Abb. 1, Wasserkessel im Haushalt) läßt man einen mit Wasser gefüllten Kessel von der Heizflamme von unten oder durch Flammrohre bestreichen. Der Vorteil derartiger Kessel liegt in der einfachen Bedienung, als Nachteil machen sich ihre wegen der beschränkten Rostfläche und des trägen Wasserumlaufs geringe Dampfleistung, ihr großer Platzbedarf und geringer Betriebsdruck bemerkbar. Kessel dieser Art verwendet man deshalb heute nur noch bei Lokomotiven oder bei Anlagen, die verhältnismäßig wenig Dampf benötigen.
Moderne Hochleistungskessel, die sehr schnell hohe Belastungsspitzen erreichen müssen, sind Wasserrohrkessel. In ihnen wird das Wasser in Rohren verdampft, die durch einen beheizten Raum laufen, wo sie von der Strahlungswärme der Flammen und den heißen Rauchgasen bestrichen werden. Man baut sie als Steilrohr- (Abb. 2) oder als Schrägrohrkessel (Abb. 3), die sich, wie ihr Name sagt, durch die Lage der wasser- bzw. dampfführenden Rohre unterscheiden. Die Verbindung der Rohrenden erfolgt durch Trommeln oder Kammern, die meist senkrecht zu den Rohren liegen. Das durch die Rauchgase vorgewärmte Kesselspeisewasser fließt in die obere Trommel und fällt von dort durch unbeheizte oder nur schwach beheizte Rohre in die unteren Kammern oder Trommeln und steigt von da aus in die Wasserrohre. Dort wird es verdampft und steigt als Wasser-Dampf-Gemisch zurück in die obere Trommel. Hier wird der Dampf vom mitgerissenen Wasser getrennt und strömt durch die Überhitzerrohre, die von noch ausreichend warmen Rauchgasen beheizt werden. Anschließend strömt der Dampf zum Verbraucher. Das abgetrennte Wasser strömt zusammen mit dem Frischwasser nach unten zurück und der Kreislauf beginnt von neuem.
Beheizt werden die genannten Kessel mit Kohle oder Öl. Bei Kohlenfeuerung benutzt man meist Wanderroste (Abb. 4). Das sind langsam laufende, endlose Ketten von Roststäben. Die auf der einen Seite aufgegebene Kohle verbrennt im Feuerungsraum. Ihre Rückstände, Schlacke und Asche, fallen auf der anderen Seite in den Schlackenabzug. Zur Regelung der Verbrennung bläst man Luft von unten her durch den Rost in den Feuerungsraum. Bei anderen Kohlenfeuerungen wird Kohlenstaub zusammen mit Luft in den Feuerungsraum eingeblasen und dort bei Temperaturen von etwa 1800°C verbrannt. In anderen Systemen wird Öl durch Düsen fein verteilt in den Brennraum geblasen und verbrannt. Der Brennraum selbst ist innen mit Schamotte ausgekleidet. Darüber hinaus sind in die Schamotteschicht noch Wasserrohre eingelagert, die die Strahlungswärme aufnehmen, die Schamotte schützen und zusätzlich Dampf erzeugen (Strahlungskessel).
Spezialkessel können Hochdruckdampf von 100–225 atü erzeugen. Bei dieser Art von Kesseln wird das Wasser umgepumpt (Zwangsumlaufkessel; Abb. 5), d. h., es wird sechs- bis siebenmal soviel Wasser im Kreislauf durch die Rohre geführt wie der Verdampfungsleistung entspricht, oder das Wasser wird einfach durch die Rohre des Kessels gepumpt (Zwangsdurchlaufkessel; Abb. 6).

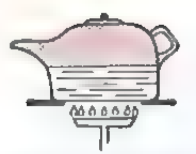


Abb. 1 Wasserkessel

Abb. 3 Schrägrohrkessel

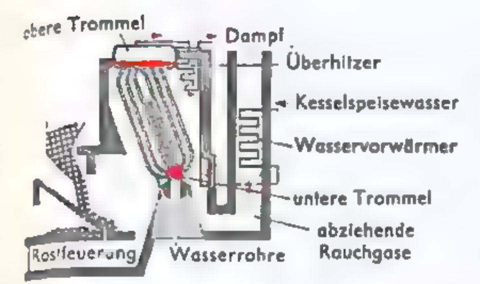


Abb. 2 Steilrohrkessel

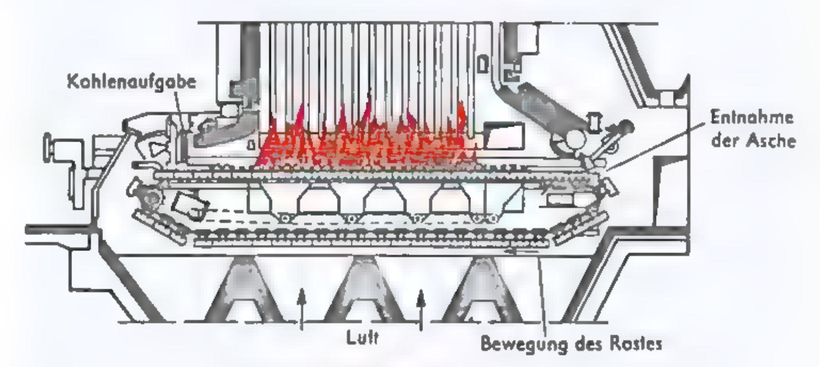


Abb. 4 Zonenwanderrost

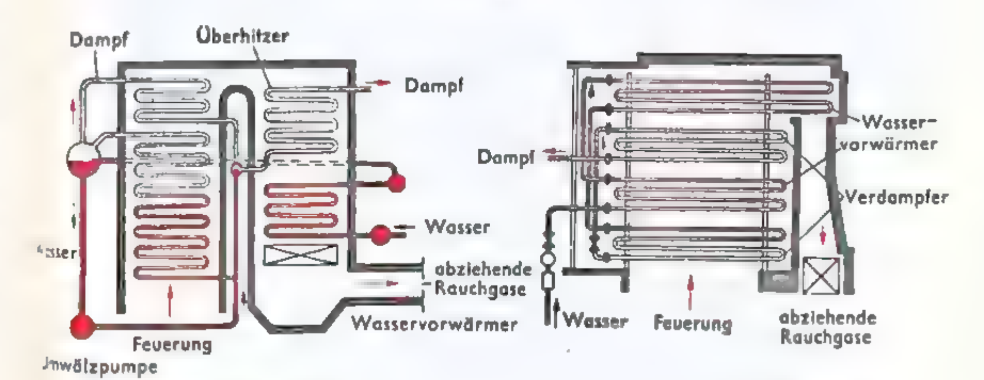


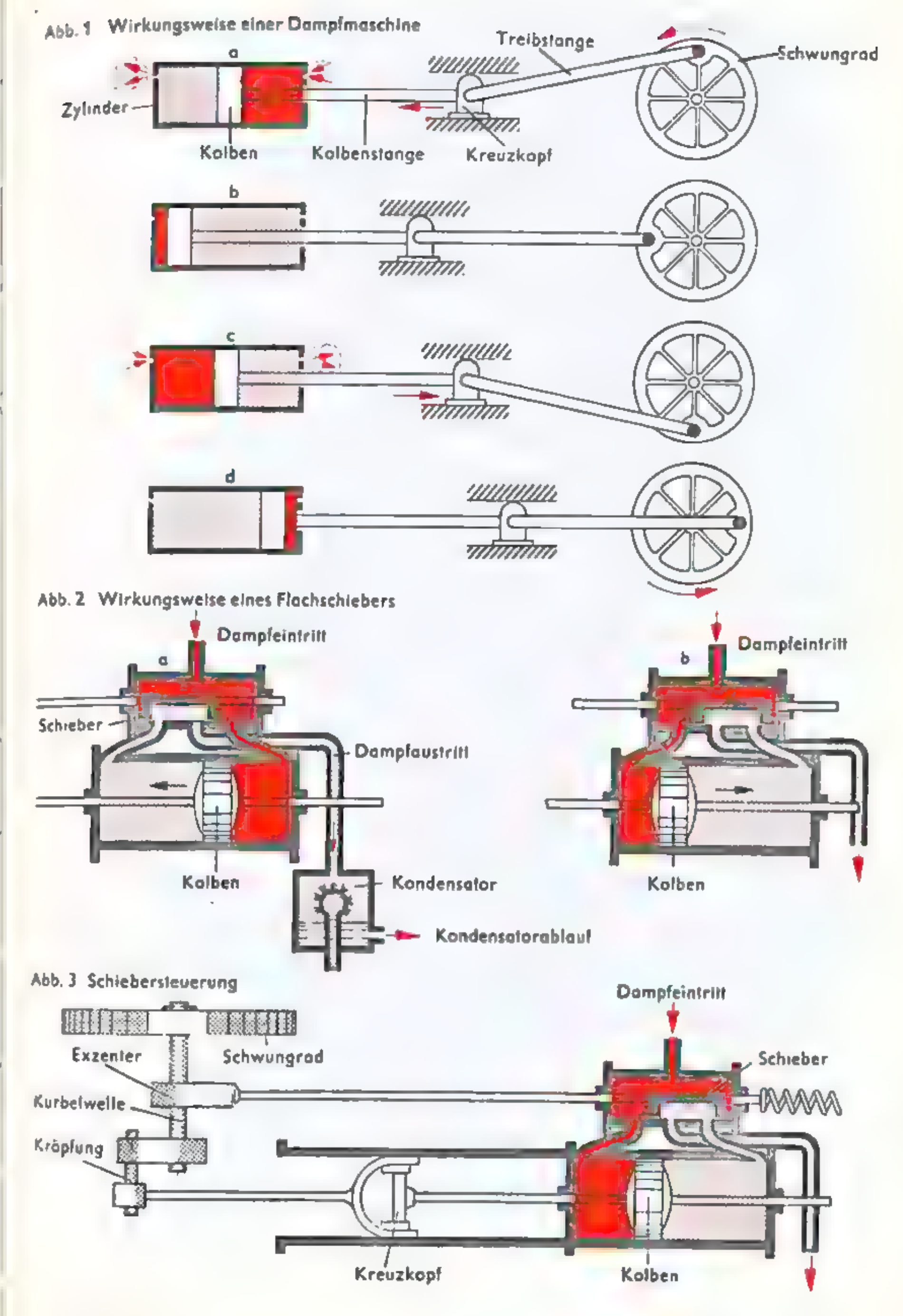
Abb. 5 Zwangsumlaufkessel

Abb. 6 Zwangsdurchlaufkessel

DAMPFMASCHINE

Dampfmaschinen nutzen die Energie aus, die in Wasserdampf, der unter hohem Druck steht, enthalten ist. Die bei der Entspannung des Dampfes freiwerdende Energie erzeugt eine Drehbewegung, die zum Antrieb von Arbeitsmaschinen verwendet werden kann. Der unter hohem Druck stehende Dampf wird in einen Zylinder geleitet, in dem sich ein Kolben befindet. Hier dehnt er sich aus und bewegt dadurch den Kolben (Abb. 1a). Ist der Kolben am Ende des Zylinders angelangt, d. h., hat er seinen Tot- oder Umkehrpunkt erreicht (Abb. 1b), dann kann der nun entspannte Dampf entweichen und die Frischdampfzufuhr wird umgesteuert. Frischer Dampf tritt nun an der anderen Seite des Kolbens ein und schiebt ihn wieder an seinen Ausgangspunkt zurück (Abb. 1c), bis er seinen anderen Umkehrpunkt erreicht hat (Abb. 1d). Eine Maschine dieser Art nennt man doppeltwirkend, weil die Kraft des Dampfes wechselweise auf zwei Seiten wirkt. Während der Kolben auf der einen Seite geschoben wird, drückt er auf der anderen Seite den entspannten Dampf aus dem Zylinder heraus. Die Umsteuerung des Dampfes, d. h. das Hinleiten des Frischdampfes auf die entsprechende Kolbenseite und das Auslassen des Entspannungsdampfes aus der anderen Seite, besorgt ein Steuerapparat, der sog. Schieber. Bisweilen erfolgt die Umsteuerung auch wie beim Verbrennungsmotor durch Ventile. Der gebräuchlichste Schieber ist der Flachschieber (Abb. 2). Er überdeckt wechselseitig den Dampfeintritts- bzw. -austrittsschlitz. Im Verlauf der Kolbenbewegung öffnet der Schieber auf der anderen Seite den Schlitz für den Austritt des Dampfes, der sich hinter dem Kolben befindet, und befördert ihn in den sog. Auspuffkanal (Abb. 2a u. 2b). Der Schieber muß also immer so stehen, daß er die arbeitende Kolbenseite mit dem Frischdampf, die ausstoßende Kolbenseite mit dem Abdampfaustritt verbindet. Zu diesem Zweck bewegt er sich entsprechend der Kolbenbewegung hin und her. Er wird durch ein Gestänge von der Kurbelwelle aus so gesteuert (Abb. 3), daß eine gegenläufige Bewegung des Schiebers zustande kommt. Der Restdampf geht nach dem Austritt aus der Maschine weiter in einen Kondensator, wo er sich durch Abkühlung niederschlägt. In anderen Fällen (z. B. bei der Dampflokomotive) strömt er direkt ins Freie.

Von Verbundmaschinen spricht man, wenn der Dampf in mehreren Zylindern (meist drei) nacheinander in Stufen entspannt wird. Dabei haben meist alle Kolben den gleichen Hub, da sie ja die gleiche Kurbelwelle antreiben. Weil jedoch das Volumen des Dampfes bei Entspannung, d. h. mit abnehmendem Druck, größer wird, hat die zweite Stufe (die Mitteldruckstufe) einen größeren Kolbendurchmesser als die erste (die sogenannte Hochdruckstufe) und die dritte Stufe (die Niederdruckstufe) einen noch größeren Kolbendurchmesser als die Mitteldruckstufe. Die Übertragung von Kraft und Bewegung auf die Antriebswelle (Kurbelwelle) geschieht durch Pleuel- oder Treibstangen über einen Kreuzkopf (Abb. 1 u. 3), ein Formstück, das sich in einer Gleitbahn hin- und herbewegt. An ihm sind zwei Stangen befestigt, einmal die Kolbenstange, welche die Bewegung des Kolbens auf den Kreuzkopf überträgt, zum anderen die Treibstange, die einerseits beweglich am Kreuzkopf, andererseits am Umfang eines Rades (oder an der Kröpfung der Kurbelwelle) befestigt ist. Bewegen sich nun der Kolben und der Kreuzkopf hin und her, so überträgt der letztere diese Bewegung auf die Kurbelwelle oder den Radumfang und erzeugt so eine Drehung. Eine Schwungscheibe an einem Ende der Kurbelwelle garantiert eine stoßfreie Umdrehung. Dampfmaschinen werden heute nur noch dort verwendet, wo man langsam laufende Maschinen mit stark wechselndem Kraftbedarf benötigt, wie z. B. bei Förderantrieben in Bergwerken, bei Walzenantrieben und Schiffsmaschinen. Die in der Kohle enthaltene Energie wird auch von den besten Dampfmaschinen nur zu 15 bis 18% ausgenutzt.



DAMPFTURBINEN

In Dampfturbinen erzeugt Wasserdampf, der unter Druck steht, eine mechanische Drehbewegung, deren Energie man meistens zur Stromerzeugung benutzt. Dabei läßt man den Wasserdampf aus einer Düse mit großer Geschwindigkeit austreten und ihn auf Platten auftreffen, die auf einem drehbaren Rad angebracht sind. Durch die Geschwindigkeit, mit der die Dampfmenge auf diese Platten auftrifft, wird das Rad in Drehung versetzt. Um die im Dampf enthaltene Druckenergie möglichst vollständig in Geschwindigkeitsenergie umzusetzen, verwendet man bei den Dampfturbinen sogenannte Lavaldüsen (Abb. 1), die aus dem Eintrittsteil mit abgerundeten Ecken, dem engsten Querschnitt und dem nachgeschalteten erweiterten Teil bestehen. Durch die Querschnittsverengung und den Diffusor wird der Druck weitgehend in Geschwindigkeit umgewandelt. Je größer die Dampfgeschwindigkeit ist, um so größer ist auch die Kraft, die der Dampfstrahl auf ein in seinen Weg gestelltes Hindernis ausüben kann. Dabei wiederum ist ausschlaggebend, in welchem Maße der Strahl von seinem ursprünglichen Weg abgelenkt wird. Bringt man eine Anzahl von Platten, die den Dampf nahezu in Umfangsrichtung ablenken (Abb. 2), auf einem Rad an, so übt der Dampf eine Kraft auf das Rad in Umfangsrichtung aus und versetzt es in Drehung (Abb. 3). Zur vollen Ausnutzung der im Dampf enthaltenen Energie werden meist mehrere Stufen hintereinander angeordnet. Die mit Schaufeln versehenen Laufräder sitzen dabei alle auf einer Welle, sie haben infolgedessen alle die gleiche Drehzahl. Der Abbau des Druckes und die Zunahme des Durchmessers der Laufräder erfolgt in ganz bestimmten, errechneten Stufen. Man kann theoretisch den gesamten Druck des Wasserdampfes (z. B. 100 atü) in einer einzigen Düse auf Atmosphärendruck entspannen und in Geschwindigkeit umwandeln. Dabei müßte jedoch das Rad mit sehr hoher Umfangsgeschwindigkeit laufen, um einen vernünftigen Umsetzungswirkungsgrad zu erhalten; die auftretenden Zentrifugalkräfte würden dabei zur Zerstörung der Maschinen führen. Man baut daher Turbinen mit stufenweisem Abbau der Energie nach verschiedenen Prinzipien:

1. Die Geschwindigkeitsstufung: In einer Düse wird hier zwar der gesamte Dampfdruck in Geschwindigkeit umgewandelt, diese jedoch in mehreren hintereinander auf der gleichen Welle sitzenden Rädern stufenweise ausgenutzt (Curtis-Turbinen; Abb. 4).
2. Die Druckabstufung: Der eintretende Dampf wird durch eine Düse entspannt und in einem nachgeschalteten Rad die daraus resultierende Geschwindigkeit aufgebraucht. In einem als Düse dienenden nachfolgenden Leitapparat wird der Dampf wiederum ein wenig entspannt und im darauffolgenden Rad die Geschwindigkeit verbraucht (Abb. 2). Diese Folge von Düse und Rad wird so lange fortgesetzt, bis der gesamte Dampfdruck abgebaut ist. Durch alle Räder strömt nacheinander die gleiche Gewichtsmenge Dampf. Da aber mit dem schrittweisen Abbau des anfänglich hohen Dampfdrucks das Dampfvolumen mehr und mehr zunimmt, müssen die Durchtrittsquerschnitte an den Schaufeln der einzelnen Laufräder und den Düsen immer größer werden. Die Laufräder am Ende der Turbine haben infolgedessen einen größeren Außendurchmesser als die am Anfang (Gleichdruck- oder Aktionsturbinen).
3. Die Überdruckabstufung: Hier wird Druck nicht nur in Düsen oder Leitapparaten abgebaut, sondern auch in den Rädern durch Druckabbau noch zusätzliche Geschwindigkeit gewonnen (Überdruck- oder Reaktionsturbinen; Abb. 5).

Eine weitere Unterteilung der Dampfturbinen kann nach dem von ihnen ausgenützten Dampfdruckgefälle vorgenommen werden. So nutzen z. B. Kondensationsturbinen (Abb. 5) das gesamte zur Verfügung stehende Gefälle vom hohen Druck bis zum Vakuum im Kondensator aus, Gegendruckturbinen nur den oberen, Abdampfturbinen nur den unteren Teil des Gefälles.

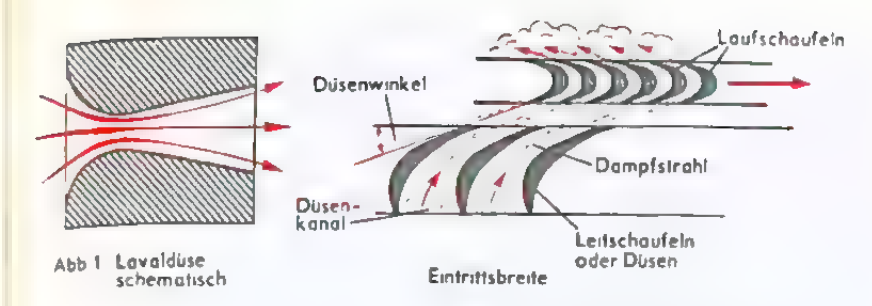
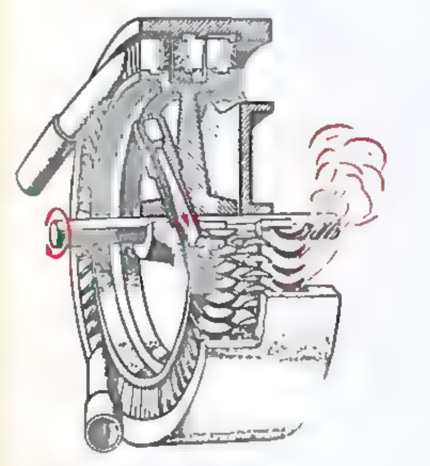


Abb 1 Lavaldüse schematisch

Abb. 2 Umlenkung des Dampfstrahls (Druckabstufung)


Abb 3 Antrieb eines Rades mit Laufschaufeln (schematisch)

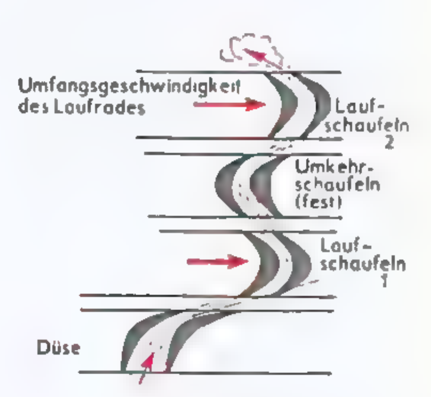


Abb. 4 Zweikranz-Curtis-Turbine schematisch (Geschwindigkeitsstufung)

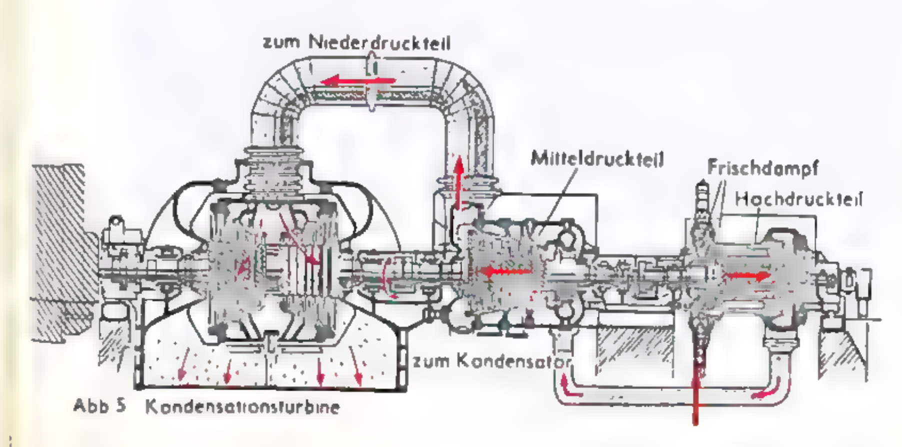


Abb 5 Kondensationsturbine

GASTURBINE

Gasturbinen werden mit den Verbrennungsgasen flüssiger Treibstoffe betrieben. Sie gleichen in Betriebsweise und Aufbau stark der Dampfturbine (s. S.228), denn auch in der Gasturbine erzeugt ein energiereiches strömendes Medium (die Verbrennungsgase) durch Umlenkung in mit Schaufeln versehenen Rädern eine drehende Bewegung. Abb. 1 zeigt schematisch die Wirkungsweise einer Gasturbine: Der Verdichter, auch Turbokompressor genannt, saugt Frischluft an und verdichtet sie auf 3 bis 5 atü; er drückt sie über einen Wärmetauscher, wo sie durch die noch heißen, der Turbine entströmenden Verbrennungsgase vorgewärmt wird, schließlich in die Brennkammer. Hier werden flüssige Brennstoffe verbrannt, so daß Verbrennungsgase von rund 650°C entstehen. Diese Verbrennungsgase strömen mit großer Geschwindigkeit in die Turbine und treiben sie an.
Die Turbine selbst, der Kompressor und der der Stromerzeugung dienende Generator sitzen auf einer Welle. Die Turbine kann nicht ihre gesamte Leistung zur Stromerzeugung auf den Generator übertragen, da sie einen erheblichen Teil davon zum Antrieb des Turbokompressors benötigt. Zum Anfahren der Turbine verwendet man einen Elektromotor, der erst einmal den Kompressor in Betrieb setzen muß, damit Luft gefördert und verdichtet wird und zur Erzeugung der Brenngase zur Verfügung steht. Erst dann kann die Turbine anspringen. Abb. 2 zeigt die Ausführung einer Gasturbine. Die bekannteste Ausführungsform von Gasturbinen ist das Strahltriebwerk eines Flugzeugs (s. S. 594 ff.). Dieses stellt jedoch nur eine Spezialanwendung dar, während normale Gasturbinen sonst nur dort Verwendung finden, wo flüssige Treibstoffe billiger als Kohle sind.
Ein anderer Typ der Gasturbine ist die Heißluftturbine (Abb. 3). Hier durchströmen nicht die heißen Verbrennungsgase die Turbine, sondern Luft, die in einem Wärmetauscher durch die heißen Verbrennungsgase erhitzt wird. Diese Heißluft läuft immer im Kreis, d. h., nach Verlassen der Turbine saugt sie der Kompressor erneut an. Zuvor muß jedoch die Luft jeweils gekühlt werden, da sonst die Schaufeln des Kompressors bei zu hohen Temperaturen arbeiten müßten und bald zerstört wären.

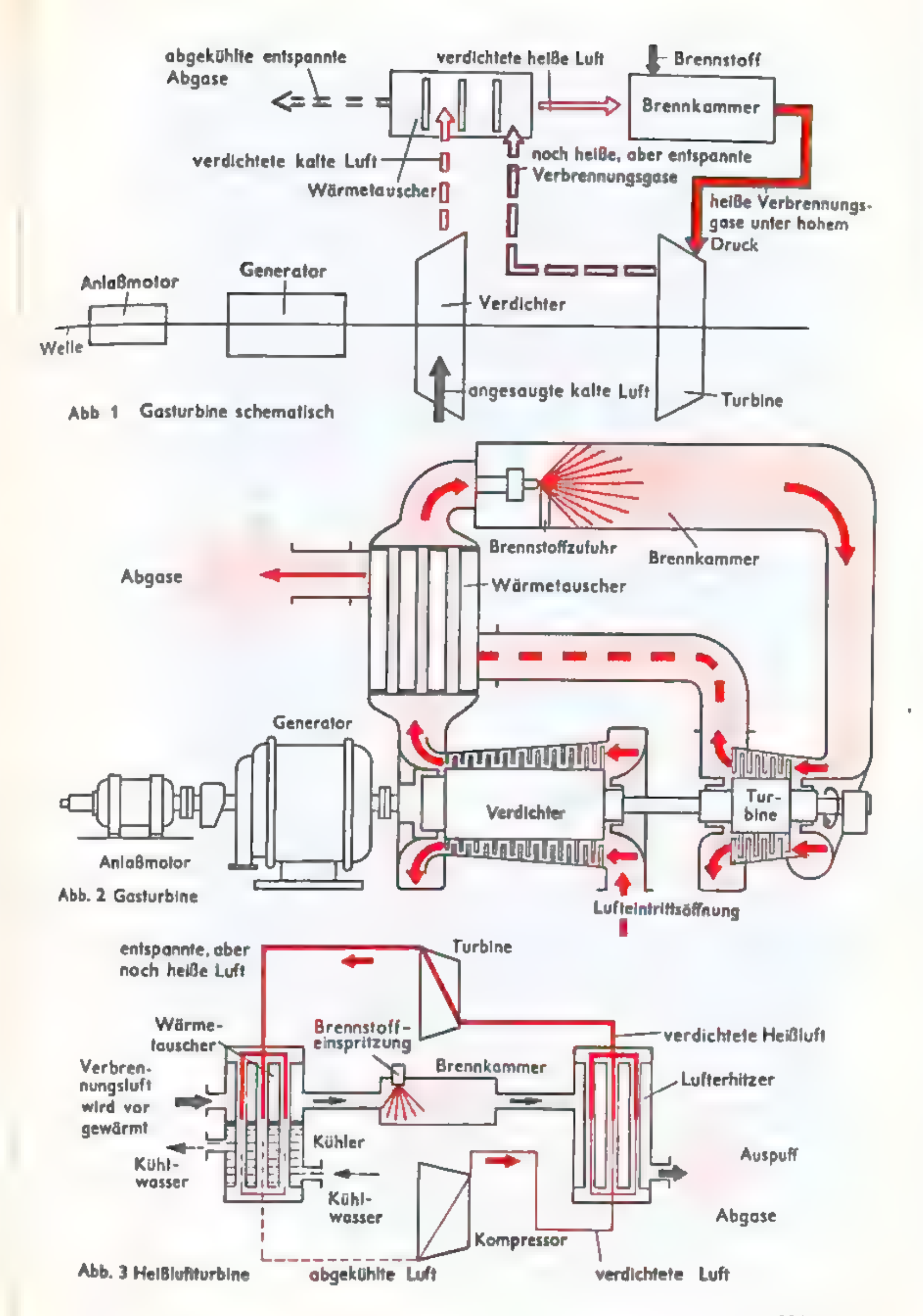


Abb 1 Gasturbine schematisch

Abb. 2 Gasturbine

Abb. 3 Heißluftturbine

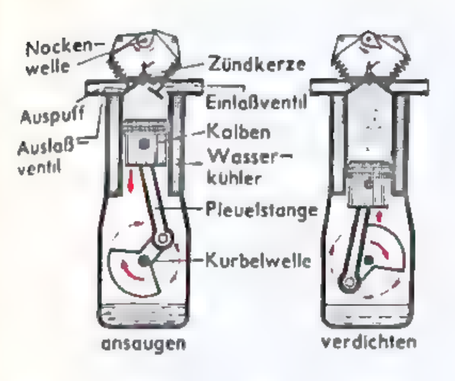
OTTOMOTOREN I

Der Ottomotor ist wie der Dieselmotor (s. S. 236) eine Verbrennungskraftmaschine: Die bei der Verbrennung des Kraftstoffs freiwerdende thermische Energie wird in mechanische Energie umgewandelt. Zum Unterschied vom Dieselmotor wird der flüssige Kraftstoff in einem Vergaser (s. S. 526 ff.) oder mit einer Einspritzvorrichtung der zu seiner Verbrennung erforderlichen Luft beigemischt, dann das enstandene brennfähige Kraftstoff-Luft-Gemisch im Zylinder verdichtet und schließlich durch den elektrischen Funken einer Zündkerze [fremd] gezündet. Genau wie beim Dieselmotor wird der Kolben durch den Druck der bei der Verbrennung entstehenden Gase im Zylinder abwärtsbewegt. Durch die mit dem Kolben verbundene Pleuelstange wird die Kurbelwelle in Drehung versetzt. Anschließend müssen die verbrannten Gase aus dem Zylinder und frisches Kraftstoff-Luft-Gemisch in den Zylinder gebracht werden, um ein neues Arbeitsspiel beginnen zu können. Die zur Durchführung dieses Ladungswechsels erforderliche Energie wird vom Schwungrad abgegeben, da dieses die bei der Verbrennung im Zylinder freiwerdende mechanische Energie durch Drehzahlerhöhung speichert. Der noch verbleibende Energieüberschuß kann am freien Ende der Kurbelwelle abgenommen werden. Beim Ottomotor unterscheidet man genau wie beim Dieselmotor zwischen dem Viertakt- und dem Zweitaktverfahren. Zur Durchführung eines Arbeitsspiels (Ladungswechsel und Verbrennung) benötigt der Viertaktmotor vier Takte bzw. vier Hübe des Kolbens, der Zweitaktmotor nur zwei Hübe.

Viertaktmotor

1. Takt: Ansaugen: Bei geöffnetem Einlaßventil saugt der Kolben beim Abwärtsgang frisches Kraftstoff-Luft-Gemisch in den Zylinder.
2. Takt: Verdichten: Bei geschlossenen Ventilen verdichtet der aufwärtsgehende Kolben das Kraftstoff-Luft-Gemisch auf einen Druck von etwa 7—8 at; dann Zündung durch Zündkerze.
3. Takt: Arbeiten: Bei geschlossenen Ventilen treibt der Druck der bei der Verbrennung entstehenden Gase den Kolben abwärts.
4. Takt: Ausschieben: Bei geöffnetem Auslaßventil schiebt der aufwärtsgehende Kolben die verbrannten Gase aus.

Da nur in einem einzigen Takt Arbeit anfällt, hat der Einzylindermotor einen schlechten Gleichförmigkeitsgrad, d. h., die Kurbelwelle ist während eines Arbeitsspiels starken Drehbeschleunigungen und -verzögerungen unterworfen. Mehrzylindermaschinen haben einen gleichförmigeren Lauf, da man durch entsprechenden Versatz der einzelnen Kröpfungen der Kurbelwelle (Abb. 3) erreichen kann, daß die Arbeitstakte der einzelnen Zylinder nicht zu gleicher Zeit, sondern nacheinander und unter Umständen sich überschneidend erfolgen. Je nach der Zylinderanordnung unterscheidet man zwischen Reihenmotor (Abb. 3), Boxermotor (Abb. 4), V-Motor (Abb. 5) und Sternmotor (Abb. 6).



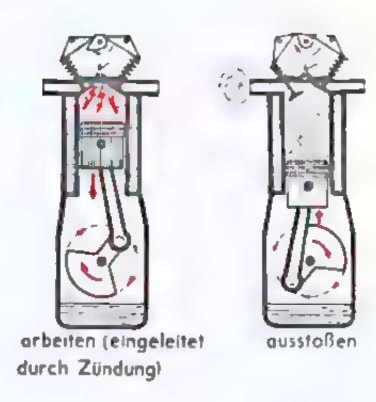


Abb 1 Wirkungsweise eines Viertaktmotors

Abb. 2 Arbeitsschema eines 6-Zylinder-Reihenmotors

Abb 3 Schnitt durch einen 4-Zylinder-Reihenmotor



Abb 4 Boxermotor

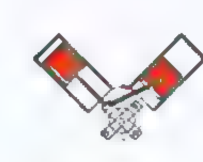


Abb 5 V-Motor

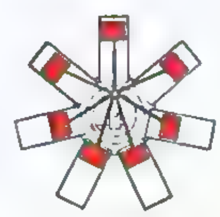


Abb. 6 Sternmotor

OTTOMOTOREN II

Zweitaktmotor

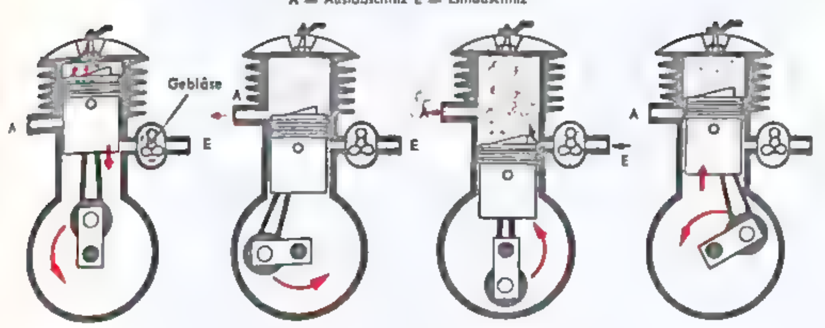
Hier gibt der Kolben bei seinem Hin- und Hergang Öffnungen in der Zylinderwandung, die sog. Schlitze, frei (nur selten besitzt der Zweitaktmotor Ventile).

Zur Verdeutlichung der beiden Takte nehme man an, daß bei dem gebläsegespülten Zweitaktmotor der Abb. 7 bei Beginn des ersten Taktes der Kolben in der höchsten Stellung steht und das über ihm befindliche verdichtete Kraftstoff-Luft-Gemisch gezündet ist. Der Kolben geht dadurch abwärts und gibt zunächst mit seiner Oberkante den Auslaßschlitz frei. Dadurch können sich die im Zylinder befindlichen, aber noch unter hohem Druck stehenden verbrannten Gase durch diesen Schlitz in den Auspuff entspannen. Wird bei weiterem Abwärtsgang des Kolbens der Einlaßschlitz freigegeben, so drückt das Gebläse frisches Kraftstoff-Luft-Gemisch in den Zylinder, wodurch die restlichen verbrannten Gase ausgespült werden. Bei Aufwärtsgang des Kolbens (2. Takt) wird nach Abschluß aller Schlitze das Kraftstoff-Luft-Gemisch verdichtet, so daß ein neues Arbeitsspiel beginnen kann.

Beim kurbelkastengespülten Zweitaktmotor (Abb. 8) wird das Gebläse dadurch eingespart, daß man das Kurbelgehäuse luftdicht abschließt, so daß es mit dem Kolben zusammen als Pumpe arbeiten kann. Bei Aufwärtsgang des Kolbens entsteht im Kurbelgehäuse Unterdruck, bis die Unterkante des Kolbens den Einlaßschlitz und damit den Weg für das frische Kraftstoff-Luft-Gemisch ins Kurbelgehäuse freigibt. Bei Abwärtsgang des Kolbens wird das im Kurbelgehäuse befindliche Kraftstoff-Luft-Gemisch etwas verdichtet, so daß es, sobald die Oberkante des Kolbens den Überströmschlitz und damit den Überströmkanal (Verbindung vom Kurbelgehäuse zum Zylinder) freigibt, in den Zylinder gelangen kann. Gleichzeitig spielt sich oberhalb des Kolbens derselbe Vorgang wie beim gebläsegespülten Motor ab.

Das Gebläse des gebläsegespülten Motors verteuert diesen Motor. Da aber der Überströmkanal zwischen Zylinder und Kurbelgehäuse entfällt, kann die Kurbelwelle mit einer Druckumlaufschmierung versehen werden, ohne daß das dann reichlich im Kurbelgehäuse vorhandene Öl in den Zylinderraum gelangen kann. Beim billigeren kurbelkastengespülten Motor wird das Schmieröl dem Kraftstoff beigemischt und gelangt mit ihm ins Kurbelgehäuse oder wird durch kleine Schmierölpumpen tropfenweise an die zu schmierenden Stellen gebracht. Das im Kurbelgehäuse anfallende Öl wird durch den Überströmkanal leicht in den Zylinder mitgerissen, von wo es durch den Auslaßschlitz zum Auspuff gelangt und sich dort unter Umständen als blauer Qualm bemerkbar macht.

Abb. 7 Gebläsegespülter Zweitakt-Ottomotor
A = Auslaßschlitz E = Einlaßschlitz



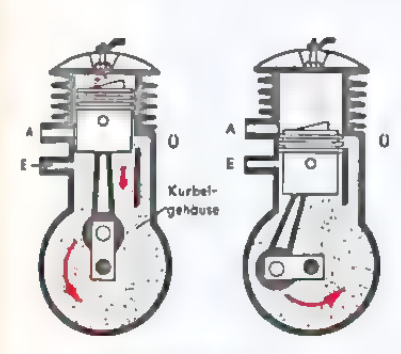
Nach Zündung Arbeitsleistung bei Abwärtsgang des Kolbens

Bei Freigabe des Auslaßschlitzes A Auspuffen der verbrannten Gase

Bei Freigabe des Einlaßschlitzes E drückt Gebläse frisches Kraftstoff-Luft-Gemisch in den Zylinder

Bei Aufwärtsgang des Kolbens nach Verschluß von A und E Verdichtung

Abb. 8 Kurbelkastengespülter Zweitakt-Ottomotor



Oberhalb des Kolbens:

Nach Zündung Arbeitsleistung bei Abwärtsgang des Kolbens

Bei Freigabe des Auslaßschlitzes A Auspuffen der verbrannten Gase

Bei Freigabe des Überströmschlitzes Ü strömt Kraftstoff-Luft-Gemisch aus Kurbelgehäuse, da es dort unter Druck steht, in den Zylinder

Bei Aufwärtsgang des Kolbens nach Verschluß von A und Ü Verdichtung

Unterhalb des Kolbens:

Bei Freigabe von Einlaßschlitz E strömt frisches Kraftstoff-Luft-Gemisch ins Kurbelgehäuse

Bei geschlossenem E und Ü wird Kraftstoff-Luft-Gemisch im Kurbelgehäuse zusammengedrückt

Nach Verschluß von E und Ü entsteht bei Aufwärtsgang des Kolbens Unterdruck im Kurbelgehäuse

DIESELMOTOR

Die Verbrennungsvorgänge bei Otto- und Dieselmotoren unterscheiden sich durch folgende wesentliche Merkmale: Beim Ottomotor (s. S. 232 ff.) wird das Kraftstoff-Luft-Gemisch in den Zylinder eingesaugt, verdichtet (4:1 bis 10:1) und durch einen Zündfunken entzündet, beim Dieselmotor hingegen wird in den Zylinder reine Luft eingesaugt und dort weit höher als beim Ottomotor verdichtet (14:1 bis 25:1). Die Luft erreicht dadurch eine Temperatur von 700 bis 900°C. Erst dann wird eine bestimmte Menge von Dieselkraftstoff in den Zylinder eingespritzt. Wegen der herrschenden hohen Temperatur entzündet sich der Kraftstoff von selbst. Die Entzündung erfolgt jedoch nicht sofort nach Eintreten der Kraftstoffteilchen in den Verbrennungsraum, sondern erst nach einer Zeit von etwa 1/1000 s. Das hängt damit zusammen, daß die Tröpfchen des Kraftstoffes sich erst mit der Luft im Verbrennungsraum innig vermischen und dann aufgeheizt und verdampft werden müssen, bevor sie verbrennen können. Die Zeit zwischen Einspritzen und Zünden nennt man den Zündverzug. Beim Einspritzen werden von der Düse in einer bestimmten Verteilung kleine und große Tröpfchen erzeugt. Die kleineren Tröpfchen befinden sich mehr in der Randzone des eingespritzten Strahles (Abb. 1) und werden zuerst entflammt. Sodann verbrennen die größeren Tropfen im Innern des Strahles. Die Einspritzung der Kraftstoffmenge geht auch nach dem Einsetzen der ersten Flammbildung weiter (Hauptverbrennung). Wenn ein Teil des Dieselkraftstoffs bei der zuerst einsetzenden Verbrennung unvollständig verbrennt oder wenn er sich so lange ansammelt, bis er bei der nachfolgenden Hauptverbrennung schlagartig verbrennt, so klopft der Motor. Im Unterschied dazu entzündet sich beim Ottomotor zunächst das Kraftstoff-Luft-Gemisch in der Nähe der Zündkerze (Abb. 2). Die von den verbrennenden Teilchen abgegebene Wärme bringt die Nachbarteilchen zur Entzündung, so daß sich im Brennraum von der Zündkerze ausgehend eine Flammfront ausbreitet, die nach und nach den ganzen Brennraum erfaßt. Durch Wärmestrahlung und durch Druckerhöhung, aber auch durch heiße Wärmenester im Brennraum kann es in dem von der Flammfront noch nicht erreichten, unverbrannten Kraftstoff-Luft-Gemisch zu einer neuen Zündung und zu einer neuen Flammfrontbildung kommen, so daß unter Umständen nun das ganze unverbrannte Kraftstoff-Luft-Gemisch von einer schlagartigen Verbrennung erfaßt wird. So kann es zum Klopfen im Ottomotor kommen.
Beim Dieselmotor kommen die gleichen Verfahren (Viertakt- und Zweitaktverfahren) zur Anwendung wie bei den Ottomotoren. Konstruktionsmäßig unterschiedliche Merkmale für Dieselmotoren ergeben sich besonders aus der Art, wie Kraftstoff und Luft miteinander in Verbindung gebracht und entzündet werden. Bei einem Dieselmotor mit Direkteinspritzung (Abb. 3) wird der Kraftstoff direkt in den Zylinder (oder auch in einen Kugelbrennraum im Kolben) eingespritzt. Die Einspritzdüse muß dabei so konstruiert sein, daß sie mit ihren Strahlen möglichst alle Luft im Brennraum erfaßt, so daß der Kraftstoff vollständig verbrennen kann. Bei Motoren mit Wirbelkammer (Abb. 4) wird die Luft vom Kolben in die Kammer hineingeschoben und erhält dadurch eine kreisende Bewegung mit großer Geschwindigkeit, wodurch die Vermischung mit dem Kraftstoff unterstützt wird. In der Vorkammer eines Dieselmotors nach Abb. 5 und 6 findet hauptsächlich eine Vermischung des Kraftstoffs mit Luft und eine Vorverbrennung statt. Durch den Druckanstieg bei der Vorverbrennung strömt das unvollkommen verbrannte Kraftstoff-Gas-Gemisch mit großer Geschwindigkeit aus der Vorkammer in den Zylinder, wo es mit der dort befindlichen Luft vollständig verbrennen kann.

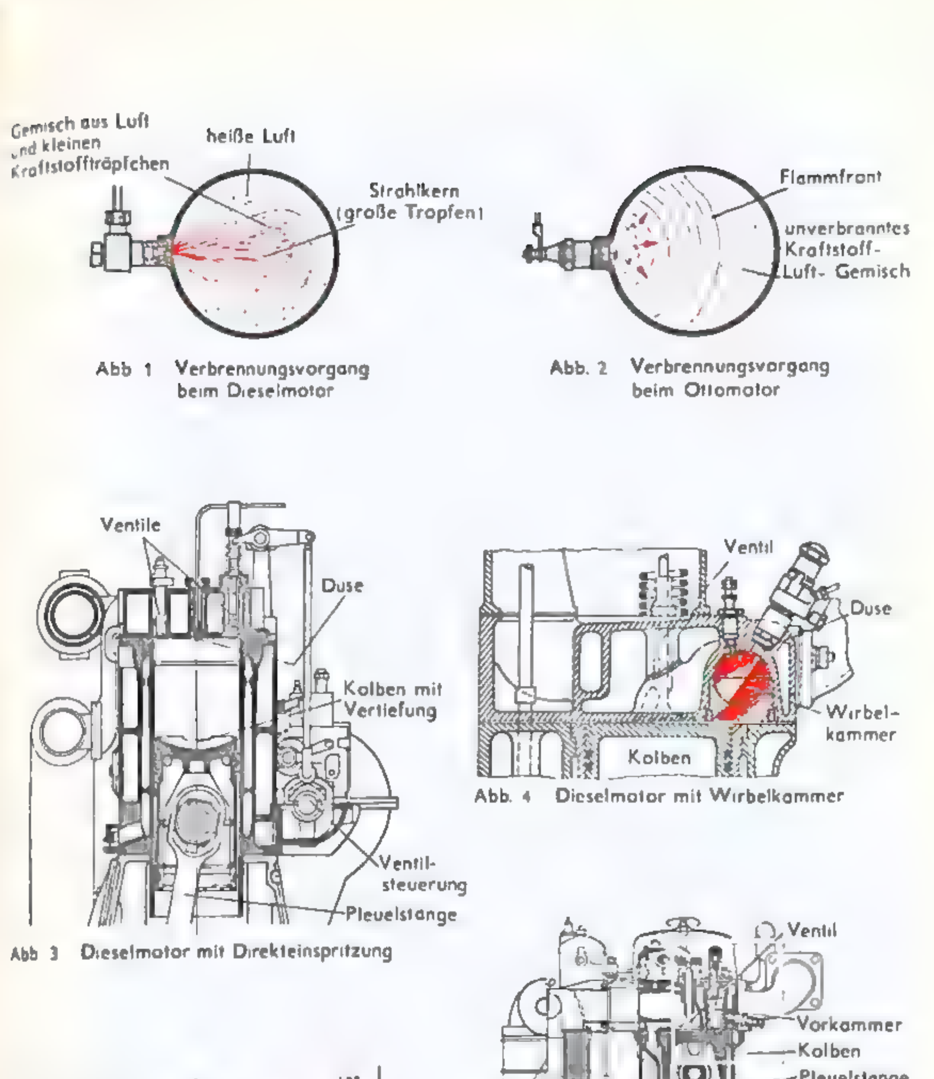


Abb. 1 Verbrennungsvorgang beim Dieselmotor

Abb. 2 Verbrennungsvorgang beim Ottomotor

Abb. 3 Dieselmotor mit Direkteinspritzung

Abb. 4 Dieselmotor mit Wirbelkammer

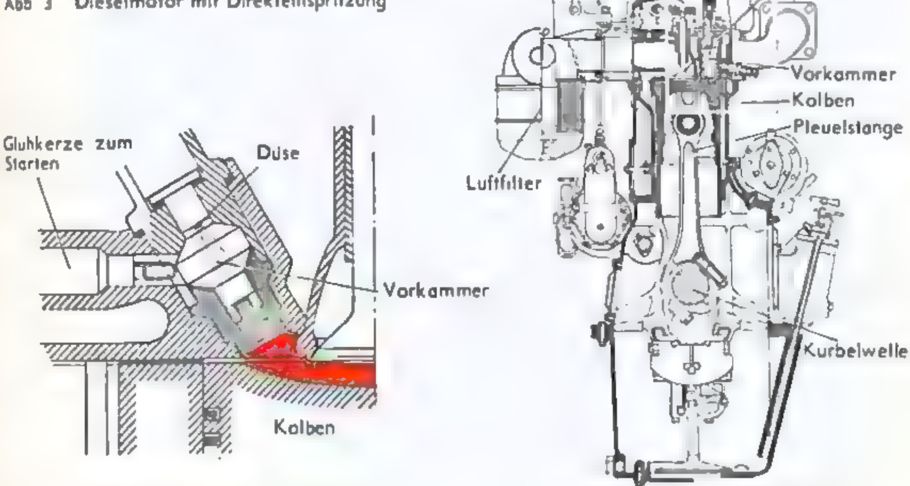


Abb. 5 Vorkammer eines Dieselmotors

Abb. 6 Dieselmotor mit Vorkammer

KREISKOLBENMOTOR I

Der Kreiskolbenmotor ist eine Viertakt-Verbrennungskraftmaschine, bei der ein dreieckförmiger Kolben in einem ovalen, in der Mitte leicht eingeschnürten Gehäuse planetenartig auf einer Kreisbahn, sich gleichzeitig drehend, umläuft, so daß der Kolben mit der Wandung des Gehäuses drei Kammern sich ständig verändernden Rauminhalts bildet.

Der nach Wankel von NSU entwickelte Kreiskolbenmotor hat ein Motorgehäuse-Mittelteil, Mantel, das auf der Innenseite eine geschlossene, in der Mitte leicht eingeschnürte, ovale Kurve, eine Epitrochoide bildet. Dies ist eine Radkurve, die z. B. entsteht, wenn auf der Außenseite eines feststehenden Kreises A ein kleinerer Kreis B abrollt (Abb. 1). Dabei beschreibt ein im Abstand (*e*) vom Mittelpunkt des kleinen Kreises B angeordneter Schreibstift S während des Umrollens des feststehenden Kreises A einen Linienzug. Dieser ist geschlossen, wenn das Durchmesserverhältnis $D:d$ eine ganze Zahl ergibt. In Abb. 1 wurde $D:d = 2:1$ gewählt.

In dem vom Mantel umschlossenen Innenraum läuft ein Kolben in der Form eines gleichseitigen Dreiecks um, dessen drei gleichlange Seiten nach außen gekrümmt (konvex) sind (Abb. 3). Während des Umlaufs liegen die drei Eckpunkte des Kolbens ständig an der Mantelwandung an, wodurch die Kolbenseiten mit der Mantelwandung drei sichelförmige Kammern veränderlichen Rauminhalts bilden. Der Mittelpunkt des gleichseitigen, dreiecksförmigen Kolbens beschreibt während seiner Umdrehung einen geschlossenen Kreis (Abb. 2). Der Mittelpunkt dieser Kreisbahn fällt mit dem Zentrum der Epitrochoide zusammen. Der Kolben führt somit eine Drehbewegung um seine Achse aus, wobei sich die Achse auf einer Kreisbahn bewegt. Die Kreisbahn des Kolbens wird durch eine zentrisch im Motorgehäuse gelagerte Welle bewirkt, die im Bereich des Kolbens als Exzenter ausgebildet ist (Abb. 4). Die vom Exzenter erzeugte Drehbewegung des Kolbens um die Kreisbahn wird durch eine Gleichlaufverzahnung erzwungen. Hierzu ist auf einer Seite innerhalb des Kolbens eine Innenverzahnung angeordnet (Abb. 3), die sich auf einem feststehenden, mit dem Motorgehäuse verbundenen Ritzel abwälzt.

Das Hohlrad und damit der Kolben ist in bezug zum Ritzel exzentrisch angeordnet (Abb. 4). Während einer Umdrehung des Exzenters wandert das Hohlrad entsprechend um das Ritzel herum. Zur Vereinfachung des Vorgangs sind in den Abb. 5 und 4 anstelle der Zähne nur Teilstriche angedeutet. Das Hohlrad ist als Kreisring, das Ritzel als Kreis dargestellt. Die dazwischenliegende, schraffierte Fläche entspricht dem Exzenter. Der Umfang beider Kreise ist in gleichlange Streckenabschnitte unterteilt. Die Durchmesser D und d sowie die Zahl der Teilstriche verhalten sich wie 3:2. Bei einer Umdrehung des Exzenters wird der größere Kreisring auf dem kleineren Kreis abgerollt. Die auf dem großen Kreis zurückgelegte Strecke entspricht dem Umfang des kleinen Kreises. Dabei wird der Kreisring um die Strecke BA in Drehrichtung des Exzenters weiterbewegt (Abb. 5). Diese Strecke entspricht dem Unterschied aus dem Umfang beider Kreise: $BA = \pi\,(D - d)$. Bezieht man diesen Zahlenwert auf den Umfang des großen Kreisringes, so gibt diese neue Zahl an, um welchen Bruchteil des Kreisringumfanges der Punkt A und somit der Kreisring weitergedreht wurde. Im vorliegenden Falle um:

$$\frac{\pi \cdot (D-d)}{\pi \cdot D} = \frac{3-2}{3} = \frac{1}{3}.$$

Bei einer Umdrehung des Exzenters legt Punkt A und somit der Kreisring $^1/_3$ der Strecke des Kreisringumfangs zurück und führt somit $^1/_3$ der Umdrehung zu der Exzenterwelle aus.

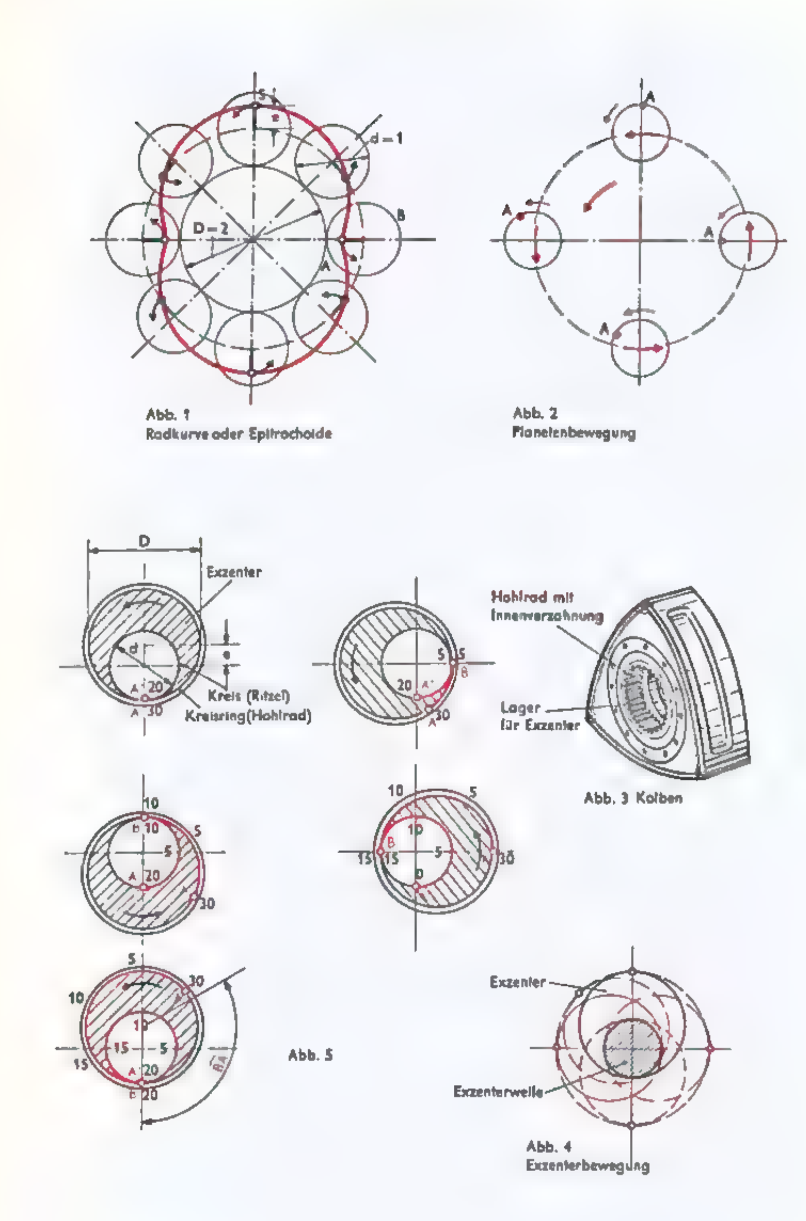


Abb. 1
Radkurve oder Epitrochoide

Abb. 2
Planetenbewegung

Abb. 3 Kolben

Abb. 5

Abb. 4
Exzenterbewegung

KREISKOLBENMOTOR II

Die sich nach dem Viertakt-Verfahren abspielenden Arbeitstakte sind in Abb. 8a—d dargestellt. Die von Kolben und Mantel gebildeten sichelförmigen Kammern A, B und C verändern infolge der überlagerten Kreis- und Drehbewegung des Kolbens ihren Rauminhalt. Im dargestellten Fall drehen sich Exzenterwelle und Kolben entgegen der Drehrichtung des Uhrzeigers. In Anlehnung an den Hubkolbenmotor spricht man von Totpunkt, wenn die auf die Kolbenflanke einwirkende Gaskraft infolge fehlenden Hebelarmes kein Moment auf die Exzenterwelle ausüben kann. In Abb. 8a befindet sich Kolbenflanke A gegenüber der Exzenterwelle in Totlage. Ein- und Auslaßkanal sind gleichzeitig geöffnet, daher Überschneidungs-Totpunkt (ÜT). Weitere Totpunktlagen zeigen Abb. 8b für Kammer C, Entspannungs-Totpunkt (ET); Abb. 8c für Kammer B Zünd-Totpunkt (ZT) und Kammer A in Abb. 8d Ansaug-Totpunkt (AT). In Abb. 8a hat A das kleinste Kammervolumen. Im Verlauf der Kolbendrehung vergrößert sich die Kammer A und saugt das im Vergaser (nicht dargestellt) aufgearbeitete Benzin-Luft-Gemisch an. In Stellung 8d weist A das größte Kammervolumen auf. Durch weitere Drehung des Kolbens (in Abb. 8a für Kammer B dargestellt) sperrt die folgende Kolbenecke die Öffnung des Ansaugkanals ab und schließt das Gasgemisch in der Kammer ein. Deren Rauminhalt verkleinert sich fortwährend, bis in Abb. 8c Kammer B den kleinsten Inhalt erreicht hat. Dabei wird das Benzin-Luft-Gemisch verdichtet und durch die Kerze (Abb. 8c) gezündet. Der Kolben dreht sich weiter (Abb. 8d). Der Explosionsdruck übt auf die Fläche der Kolbenflanke B eine Kraft aus, die infolge des Hebelarmes in der Exzenterwelle ein Drehmoment erzeugt. Im Verlauf der weiteren Kolbendrehung gibt zwischen Abb. 8a und 8b das entsprechende Kolbeneck für Kammer C den Auslaßkanal frei. Der Arbeitstakt geht über 270 Winkelgrad der Drehung der Exzenterwelle und reicht vom Zünd-Totpunkt (Abb. 8c für Kammer B dargestellt) bis zum Auslaß-Totpunkt (Abb. 8b für Kammer C gezeichnet). Bei jeder vollen Umdrehung (360°) der Exzenterwelle erfolgt eine Zündung. Daraus ergibt sich eine Ungleichförmigkeit des Drehmomentverlaufs, die durch entsprechende Schwungmassen ausgeglichen wird. Beim Kreiskolbenmotor spielen sich infolge der 3 Kammern A, B, C (Abb. 8a—d) immer drei von vier Arbeitstakten gleichzeitig ab. Die Arbeitskammern müssen daher gegenseitig abgedichtet sein. An den drei Ecken des Kolbens ist jeweils eine achsparallele Nut eingefräst, in die Dichtleisten mit geringem Spiel eingelassen sind (Abb. 7). Die Eckpunkte verbindend verläuft an beiden Stirnflächen dicht entlang der Kolbenkante eine bogenförmige Streifennut, in die entsprechende Dichtstreifen eingelegt sind. An den drei Ecken jeder Stirnfläche übernimmt ein Dichtbolzen den Anschluß zwischen Dichtleiste und den sich kreuzenden Dichtstreifen. Die Dichtleisten und Dichtstreifen werden durch untergelegte, wellenförmige Streifenfedern im Nutengrund, unterstützt vom Gasdruck, nach außen gegen die Laufflächen des Mantels und der Seitenteile gepreßt. Die Ölabdichtung zwischen Kolben und Exzenterwelle erfolgt mittels radial gespannter Metallringe.
Die Zündkerze des Kreiskolbenmotors ist hoher thermischer Belastung ausgesetzt. Damit sie auch nach längerem Teillastbetrieb störungsfrei arbeitet, ist eine Zündanlage mit steilem Anstieg der Zündspannung erforderlich. Hierdurch lassen sich den Zündfunken beeinträchtigende Kriechströme am Kerzenfuß vermeiden.
Durch Aneinanderreihen mehrerer Motorzellen entsteht der Mehrfachmotor, so daß sich mit geringem Bauaufwand bei kleiner Motorabmessung große Leistungen verwirklichen lassen. Bei dem Zweifachmotor (Abb. 9) ergibt sich, infolge der um 180° versetzten Exzenter, ein ausgeglichenerer Drehmomentenverlauf als beim zuvor beschriebenen Einfachmotor.

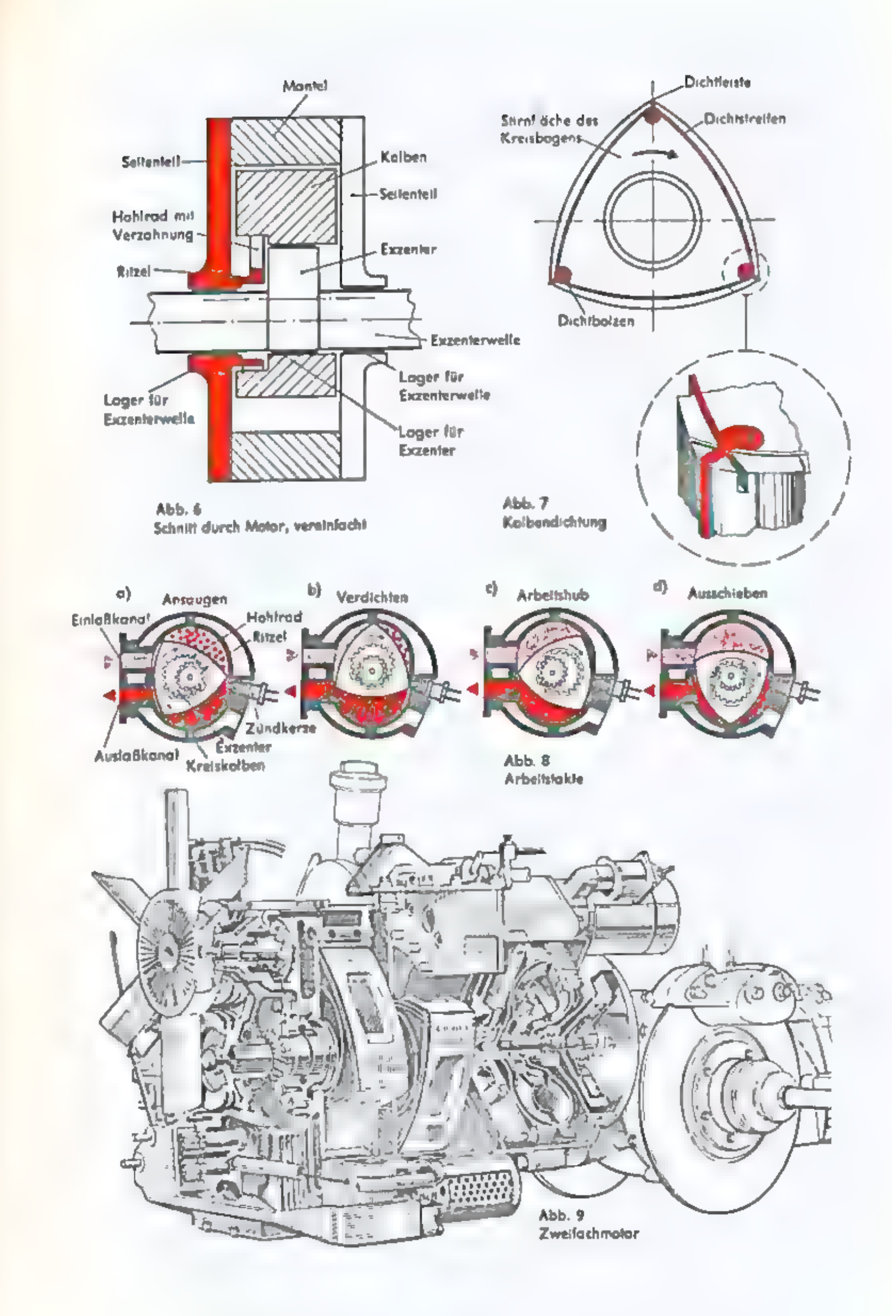


Abb. 6
Schnitt durch Motor, vereinfacht

Abb. 7
Kolbendichtung

Abb. 8
Arbeitstakte

Abb. 9
Zweifachmotor

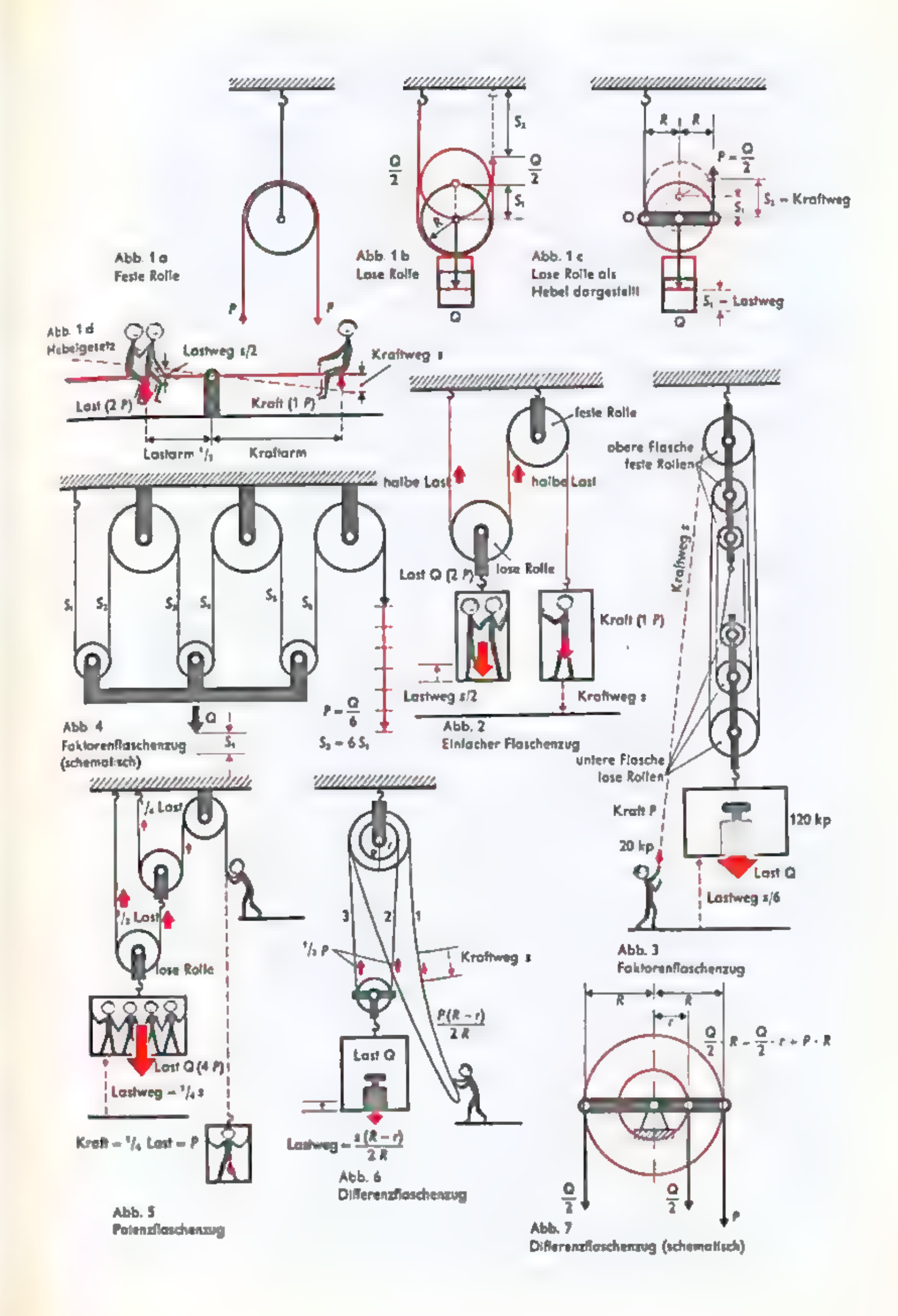
FLASCHENZUG

Der Flaschenzug ist ein Lasthebegerät, das als einfache Maschine die Kraft, die zum Heben einer Last erforderlich ist, verstärkt. Der Flaschenzug verstärkt (übersetzt) die Kraft, wobei jedoch die Arbeit (Kraft × Weg) nach der goldenen Regel der Mechanik gleich bleibt. Da Kraft × Kraftweg = Last × × Lastweg ($P \cdot S_2 = Q \cdot S_1$) ist, kann mit einer kleineren Kraft eine größere Last gehoben werden, wenn der Kraftweg gegenüber dem Lastweg entsprechend vergrößert wird.

Ein Flaschenzug besteht aus einer Anzahl von festen und losen Rollen. Eine Rolle heißt fest, wenn der Mittelpunkt bzw. die Achse der drehbaren Rolle seinen Abstand vom Aufhängepunkt beibehält (Abb. 1 a). Bei einer losen Rolle verändert sich die Lage ihres Mittelpunktes (Abb. 1 b). Die feste Rolle dient nur dazu, die Wirkungsrichtung der Kraft umzulenken. Die lose Rolle hängt an zwei Seilenden, wobei jedes Ende die halbe Last ($Q/2$) trägt (Abb. 1 b). Dies läßt sich leicht auf folgende Weise erklären. Man denkt sich die lose Rolle durch einen Hebel ersetzt, dessen Länge dem Durchmesser = 2 · Radius (R) der Rolle entspricht (Abb. 1 c). Im Punkt 0, dem momentanen Drehpunkt der Rolle, ist der Hebel aufgehängt. Die Last Q ist im Abstand R vom Drehpunkt 0 angehängt und die Kraft P zieht im Abstand $2 \cdot R$ vom Drehpunkt nach oben. Gleichgewicht herrscht nach dem Hebelgesetz (Abb. 1 d), wenn $P \cdot 2R = Q \cdot R$ ist. R kann man kürzen. Teilt man beide Seiten dieser Gleichung durch 2, dann wird $P = Q/2$. Soll die Last Q um den Lastweg S_1 angehoben werden, so ergibt sich der Kraftweg S_2 aus folgendem längenabhängigem Verhältnis $S_1 : R = S_2 : 2 \cdot R$. Wird die Gleichung durch R gekürzt und mit 2 multipliziert, so ist $S_2 = 2S_1$.

Der einfache Flaschenzug entsteht aus der Verwendung einer losen und einer festen Rolle (Abb. 2). Die Last ($2P$) wird durch die Kraft ($1P$) im Gleichgewicht gehalten. Dabei ist der Kraftweg gleich 2 mal dem Lastweg. Bei dem Faktorenflaschenzug sind die festen Rollen in einer oberen Flasche, die losen Rollen in einer unteren Flasche zusammengefaßt. An der unteren Flasche, deren Höhenlage veränderlich ist, hängt die Last an (Abb. 3). Beträgt die Last 120 kg, dann läßt sich diese mit einer Zugkraft von 20 kg anheben. Das ist leicht einzusehen, wenn man den Faktorenflaschenzug nach Abb. 4 darstellt. Jedes Seilende der drei losen Rollen trägt ($Q/6$) Last. Der Kraftweg S_2 ist 6mal so lang wie der Lastweg S_1. Den Flaschenzug nach Abb. 5 nennt man Potenzflaschenzug, da jede zusätzliche weitere lose Rolle die Möglichkeit gibt, bei gleichem Kraftaufwand die Last zu verdoppeln, so daß sich Übersetzungsverhältnisse von der Größe der Potenzen der Zahl 2 ergeben (Last : Kraft bei 2 losen Rollen $2^2 : 1 = 4 : 1$, bei 3 losen Rollen $2^3 : 1 = 8 : 1$, bei 4 losen Rollen $2^4 : 1 = 16 : 1$ usw.).

Der Differenzflaschenzug besteht aus zwei fest miteinander verbundenen festen Rollen unterschiedlichen Durchmessers und aus einer losen Rolle. Um diese Rollen ist ein endloses Seil geschlungen (Abb. 6). Dabei führt das eine von der losen Rolle kommende Seil (2) zum kleinen Rad, das andere Seil (3) zum großen Rad der festen Rolle. Denkt man sich die feste Rolle durch einen Hebel ersetzt (Abb. 7), so herrscht Gleichgewicht, wenn die an dem großen Rad angreifende Kraft P, unterstützt durch die auf das kleine Rad einwirkende Last $Q/2$, im Gleichgewicht stehen mit der am großen Rad angreifenden Last $Q/2$: $P \cdot R + Q/2 \cdot r = Q/2 \cdot R$. Daraus folgt: $P = Q \cdot (R - r)/2R$. Wählt man die Radien R des großen Rades und r des kleinen Rades der festen Rolle nur wenig voneinander verschieden, so wird der Ausdruck ($R - r$) eine kleine Zahl. Die Last Q läßt sich dann mit einer geringen Kraft P anheben. Der Differenzflaschenzug ermöglicht daher mit geringem Aufwand beinahe eine beliebig große Übersetzung der Kraft.



PUMPEN

Die Pumpe ist eine Arbeitsmaschine, die die ihr von einer Antriebsmaschine zugeführte Energie einem Gas oder Flüssigkeitsstrom mitteilt. Die Flüssigkeit erfährt dadurch eine Strömung. Damit bewirken Pumpen einen Transport von Gasen oder Flüssigkeiten in Behältern und Rohrleitungen. Die Leistung einer Pumpe wird durch die Angabe von Förderhöhe und Fördermenge bestimmt. Um z. B. eine Flüssigkeit von Behälter A nach Behälter B (Abb. 1) zu pumpen, muß der Höhenunterschied zwischen beiden Behältern überwunden werden (geodätische Flüssigkeitshöhe H_G). Beim Durchströmen der Rohrleitung erfährt die Flüssigkeit aber infolge Reibung an der Rohrwand einen Widerstand (Widerstandshöhe H_W). Ferner muß die Geschwindigkeit des strömenden Mediums aufrecht erhalten werden (Geschwindigkeitshöhe H_V). Die gesamte Förderhöhe H der Pumpe setzt sich daher aus diesen drei Komponenten zusammen. Sie wird in Meter Flüssigkeitssäule (mFS) angegeben. Die Fördermenge der Pumpe wird in Kubikmeter/Stunde (m^3/h) oder in Kubikmeter/Sekunde (m^3/s) bestimmt.

Von den vielen Pumpenbauarten sind die Kolben und die Kreiselpumpen die wichtigsten. Die Kolbenpumpe (Abb. 2) besteht aus einem Zylinder, in dem ein an der Zylinderwand abgedichteter Kolben hin und her bewegt wird. Den Hin- und Hergang des Kolbens bewirkt ein Kurbeltrieb. Am Kopf der Pumpe sind ein Saug- und ein Druckventil angeordnet. Befindet sich der Kolben in oberer Endlage (Abb. 2 a), und bewegt er sich von dieser weg, so entsteht durch den sich erweiternden Hohlraum ein Unterdruck. Sinkt dabei der Druck im Zylinder unter den auf die Flüssigkeitsoberfläche anstehenden Gasdruck, so öffnet das Saugventil und Flüssigkeit wird infolge des Druckunterschiedes in den Zylinder gedrückt. Die Pumpe saugt die Flüssigkeit an. Kehrt der Kolben nach der unteren Endlage seine Bewegungsrichtung um, so verkleinert der aufwärtsgehende Kolben den Zylinderraum (Abb. 2 b). Der Flüssigkeitsdruck steigt, wodurch das Saugventil schließt und das Druckventil öffnet. Der Kolben verdrängt die Flüssigkeit aus dem Zylinder. Erreicht der Kolben die obere Endlage, so ist der Fördervorgang beendet und ein neuer Ansaugvorgang setzt ein. Das Druckventil schließt. Infolge der hin- und hergehenden Bewegung des Kolbens wird die Flüssigkeit periodisch beschleunigt und verzögert.

Im Gegensatz zur stoßweisen Förderung der Kolbenpumpe bewirkt die Kreiselpumpe eine stetige Strömung der Flüssigkeit. Dies und der gegenüber der Kolbenpumpe bestehende Vorteil der einfacheren und bei gleicher Leistung wesentlich kleineren Bauweise hat die Kreiselpumpe zur meist verwendeten Pumpenbauart werden lassen. Die Kreiselpumpe saugt nicht selbst an und muß daher vor der Inbetriebnahme mit Flüssigkeit gefüllt werden. Das mit Schaufeln versehene Laufrad der Kreiselpumpe läuft in einem der Laufradform angepaßten Gehäuse (Abb. 3) mit hoher Drehzahl um. Die zwischen den Schaufeln befindliche Flüssigkeit wird beschleunigt und infolge der Zentrifugalkraft aus dem Laufrad herausgeschleudert. Hierdurch strömt Flüssigkeit nach, die dem Laufrad axial (auf den Mittelpunkt) zufließt und sich nach einer Umlenkung auf die durch die Schaufeln gebildeten Kanäle verteilt. Infolge der Beschleunigung erfährt die Flüssigkeit beim Durchströmen des Laufrades eine erhebliche Geschwindigkeitszunahme. Das mit hoher Geschwindigkeit aus dem Laufrad ausströmende Fördermedium durchfließt den das Laufrad umgebenden Leitapparat. Infolge der feststehenden, sich allmählich erweiternden Kanäle wird die Geschwindigkeit der Flüssigkeit stetig verzögert und die Geschwindigkeitsenergie in Druckenergie umgewandelt. Anstelle des Leitapparates kann auch ein sich stetig vergrößerndes Spiralgehäuse treten. Wegen der begrenzten Druckerhöhung einer solchen Stufe sind bei Hochdruckpumpen auf einer Welle mehrere Laufräder hintereinander angeordnet.

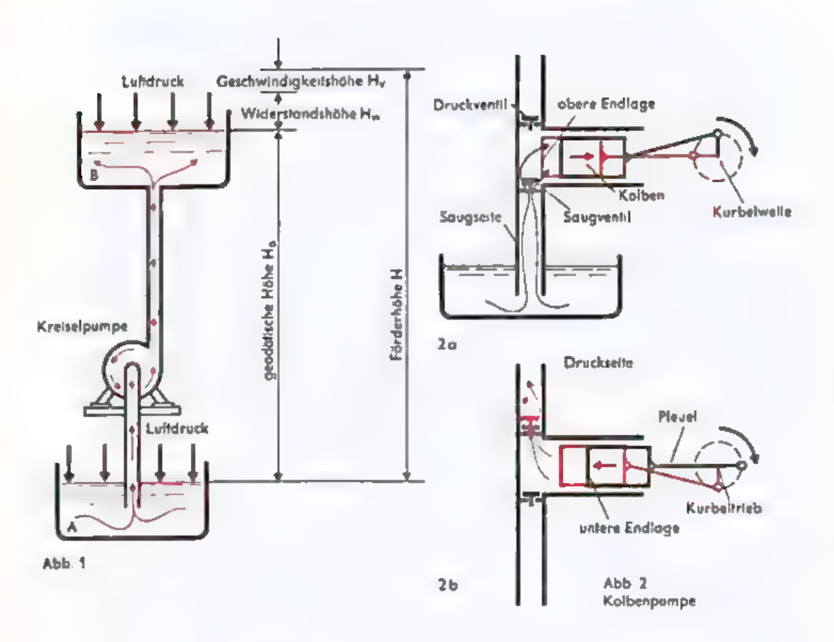


Abb. 1

Abb. 2
Kolbenpumpe

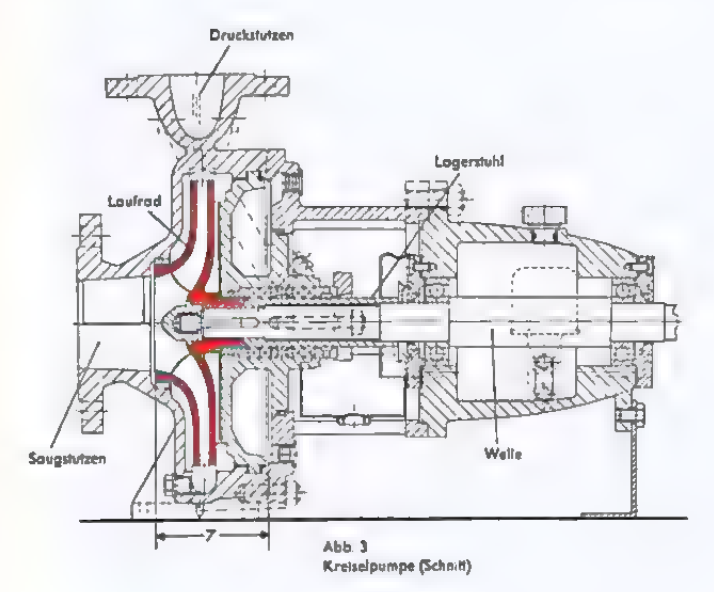


Abb. 3
Kreiselpumpe (Schnitt)

KOMPRESSOREN (KOLBENKOMPRESSOR)

Kompressoren dienen der Verdichtung von Gasen und Dämpfen auf höhere Drücke (bis 2000 atü und höher). Dabei ist den Kolbenverdichtern die Erzeugung von hohen und höchsten Drücken vorbehalten, während die Turbokompressoren für kleine bis mittlere Drücke verwendet werden.

In Abb. 1 ist ein Kolbenkompressor dargestellt. Die Kurbelwelle wird durch eine geeignete Antriebsmaschine (Elektromotor, Dampfmaschine, Verbrennungskraftmaschine usw.) über ein Schwungrad angetrieben. Das einerseits an der Kurbelwelle, andererseits am Kolben angelenkte Pleuel erzeugt aus der Drehbewegung der Kurbelwelle eine Hin- und Herbewegung des Kolbens im Zylinder. Die Ventile sind federbelastete Plattenventile, die auf die durch die Kolbenbewegung erzeugten Druckschwankungen reagieren. Beim Ansaugen wird durch den zurückgehenden Kolben im Zylinder ein Unterdruck erzeugt, so daß die Platte (Abb. 2) sich gegen den Federdruck abhebt und das Gas in den Zylinder strömen läßt. Bei Beginn des Aufwärtsgangs des Kolbens schließt das Saugventil infolge des entstehenden Überdrucks; die Verdichtung setzt ein, bis der Kolben am oberen Totpunkt angelangt ist. Jetzt ist der Druck des Gases so groß, daß die Platte des Druckventils gegen die Federkraft abgehoben wird und das Gas in die Druckleitung treten kann. Die Feder des Druckventils braucht nicht so stark zu sein, wie es im ersten Moment scheinen könnte, denn auf der anderen Seite des Druckventiles in der Druckleitung herrscht ja ein nur wenig geringerer Druck als am Ende des Verdichtungshubes im Zylinder. Dieser Druck in der Druckleitung sorgt beim Abwärtsgang des Kolbens dafür, daß das Druckventil geschlossen wird. Meist werden mit Kompressoren Zwischengefäße (sog. Puffer, bei Luftverdichtung Windkessel) unter Druck gehalten. Von diesen Puffern werden dann die Verbrauchsstellen gespeist.

Für den Arbeitsverlauf bei Kompressoren ist das sog. Indikatordiagramm (Abb. 3) kennzeichnend. Hier wird der Zusammenhang zwischen Druck und Volumen während einer Umdrehung der Kurbelwelle, also während eines Hin- und Herganges des Kolbens aufgezeichnet. Die Linie 1 kennzeichnet das Ansaugen, d. h., das Gasvolumen im Zylinder wird bei gleichem (niederen) Druck größer. Linie 2 zeigt die Verdichtung. Man sieht, daß der Druck steigt, während gleichzeitig das Volumen kleiner wird, da man Gas ja zusammenpressen kann (Versuch mit einer Fahrradpumpe: Hält man das Austrittsventil mit dem Daumen zu, so kann man den Kolben nur um einen bestimmten Betrag in den Zylinder hineinschieben, die Luft wird verdichtet). Linie 3 ist die Ausschublinie: Bei konstantem (hohem) Druck wird das Volumen im Zylinder kleiner. Linie 4 zeigt, daß das Ansaugventil sich beim Hingang (nach rechts) des Kolbens zunächst noch nicht sofort öffnen kann, da sich erst der am Ende der Verdichtung im Zylinder verbleibende Gasrest soweit entspannen muß, bis der Druck im Zylinder unter den Druck in der Ansaugleitung abgefallen ist. Erst dann öffnet das Saugventil. Da der Kolben nicht am Zylinderdeckel anstoßen darf, ist immer ein sog. schädlicher Raum und damit ein unerwünschter Gasrest vorhanden, so daß nur ein Teil des Ansaughubs wirklich zum Ansaugen ausgenutzt wird. Sind große Druckstufen zu überwinden, so wird in mehreren Stufen verdichtet, d. h., das Gas wird von einem Kompressorzylinder in den anderen geleitet (Abb. 4). Da sich die Gase beim Verdichten erwärmen – die Fahrradluftpumpe wird beim Pumpen ebenfalls warm –, muß zwischen den einzelnen Stufen gekühlt werden (Abb. 4 a). Diese mehrstufigen Kompressoren sind meist doppeltwirkend gebaut, d. h., beim Hingang des Kolbens wird auf der einen Seite des Kolbens verdichtet und auf der Rückseite angesaugt, während sich beim Hergang des Kolbens der umgekehrte Vorgang abspielt (Abb. 4 b).

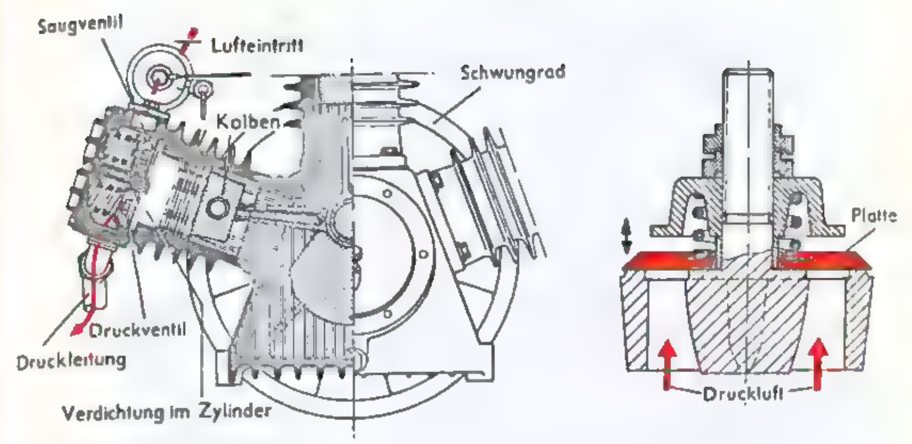


Abb. 1 Schnitt durch einen Kompressor

Abb. 2 Druckventil

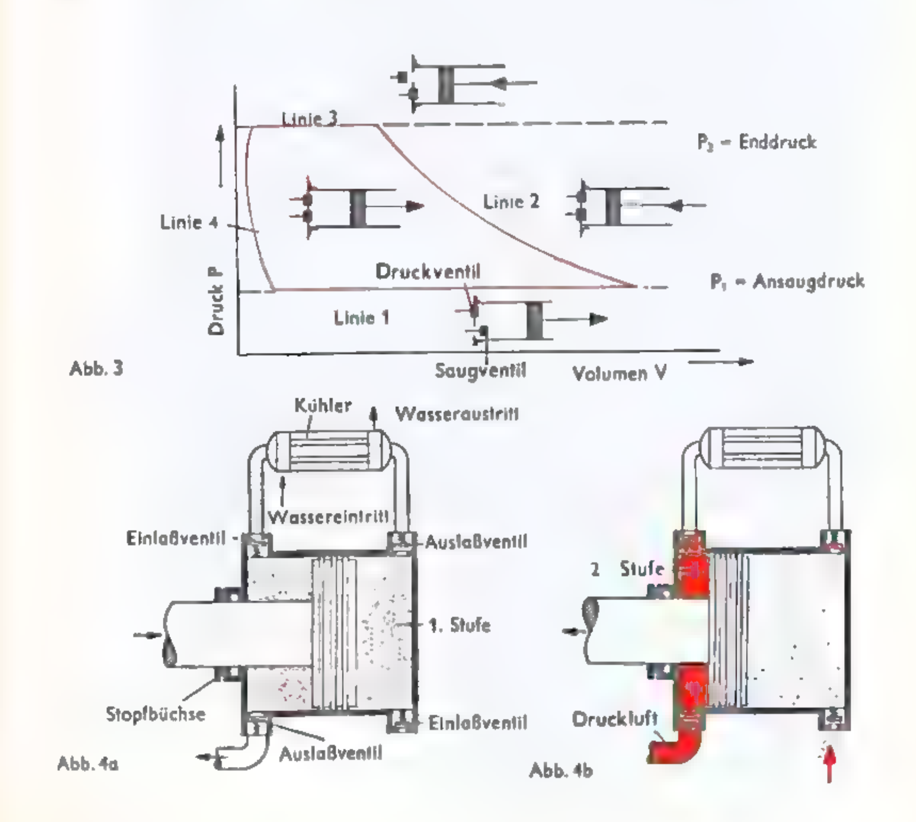


Abb. 3

Abb. 4a

Abb. 4b

DREHMASCHINE I

Bei einer modernen Zug- und Leitspindelbank ist das biegesteife Drehbankbett das Gerüst oder Rückgrat, das alle Einrichtungen der Drehmaschine aufnimmt (Abb. 2). Es besteht aus dichtem Gußeisen. Das Drehbankbett muß biegefrei, den Kräften, hervorgerufen durch den Schnittdruck beim Drehen und durch den Antrieb, widerstehen. Zur Aufnahme und fluchtenden Zentrierung des die Antriebsspindel aufnehmenden Spindelkastens und des längs und quer verschiebbaren Werkzeugschlittens ist die Oberseite des Drehbankbettes mit entsprechenden Führungen versehen. Diese sind als flache oder prismatische Führungen ausgeführt. Die Führungsbahnen sind mit großer Genauigkeit (geschliffen und geschabt) hergestellt. Das Drehbankbett ist zwischen diesen Führungsbahnen zur einwandfreien Abfuhr der Drehspäne mit nahezu senkrechten Durchbrüchen großen Querschnittes versehen.
Das zu bearbeitende Werkstück ist über eine Einspannvorrichtung kraftschlüssig mit der Arbeitsspindel verbunden und erhält von dieser seine Drehbewegung. Die Arbeitsspindel ist im Spindelstock (Spindelkasten) meist in Wälzlagern an zwei bis drei Stellen drehbar gelagert. Die Lager müssen die von der spanabhebenden Bearbeitung hervorgerufenen Axial- und Radialkräfte an das Gehäuse ableiten. Der feststehende Spindelstock ist z. B. durch die an der Bettoberfläche angebrachten Führungsprismen zentriert und mit dem Bett verschraubt. Die biegesteife Arbeitsspindel ist hohlgebohrt, damit auch die Maschinenlänge übersteigende Stangen eingeführt und bearbeitet werden können.
Für die Bearbeitung eines Werkstückes gibt es eine günstigste Schnittgeschwindigkeit. Das ist die Geschwindigkeit, mit der die zu bearbeitende Oberfläche des Werkstückes über den spanabnehmenden Drehstahl geführt wird. Die Schnittgeschwindigkeit ist in Metern je Minute (m/min) angegeben. Sie hängt von dem zu bearbeitenden Werkstoff, von dem verwendeten Drehstahl und von der gewünschten Oberflächengüte des Drehteiles ab. Die Schnittgeschwindigkeit ergibt sich aus dem Durchmesser des Drehteiles und aus der Drehzahl der Spindel. Da aber der Durchmesser der zu bearbeitenden Werkstücke ständig wechselt und außerdem die Schnittgeschwindigkeit je nach gewünschter Oberflächengüte eine andere ist, muß die Spindeldrehzahl in einem weiten Bereich veränderlich sein. Daher haben moderne Drehbänke 30 und mehr Spindel-Drehzahlstufen. Hierzu arbeitet der elektromotorische Antrieb über ein Stufengetriebe auf die Spindel (Abb. 3). Bei niederen Drehzahlen, zur groben Materialabnahme (Schruppen), erfolgt die Übertragung der Drehzahlen auf die Spindel über ein unmittelbar hinter dem vorderen Spindellager angeordnetes Zahnrad. Dagegen werden die zu einer glatten Oberfläche der Drehteile (Schlichten) erforderlichen hohen Drehzahlen von einem Wechselgetriebe aus schwingungsfrei mittels eines endlosen, elastischen Riemens auf die Spindel übertragen.
In dem häufig verwendeten Stufenrädergetriebe erfolgt die Veränderung der Spindeldrehzahl durch mehrere Zahnradpaare unterschiedlichen Umfangs und unterschiedlicher Zähnezahl. Bei den meisten Bauarten sind nur jeweils die für die gewählte Drehzahl benötigten Räder im Eingriff. Hierzu ist ein Rad jedes Zahnradpaares unverschiebbar mit der zugehörigen Zwischenwelle verbunden (Abb. 4). Das Gegenrad kann auf einer Vielkeilwelle, die eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Welle und Zahnrad schafft, so verschoben werden, daß es entweder mit dem Gegenrad im Eingriff steht oder von diesem getrennt ist. Durch Hintereinanderschalten mehrerer solcher Getriebe lassen sich eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Änderung der Spindeldrehzahl schaffen. Besitzen z. B. drei derartige Getriebe je zwei Schaltmöglichkeiten, so ergeben sich daraus bereits $2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$ verschiedene Spindeldrehzahlen.

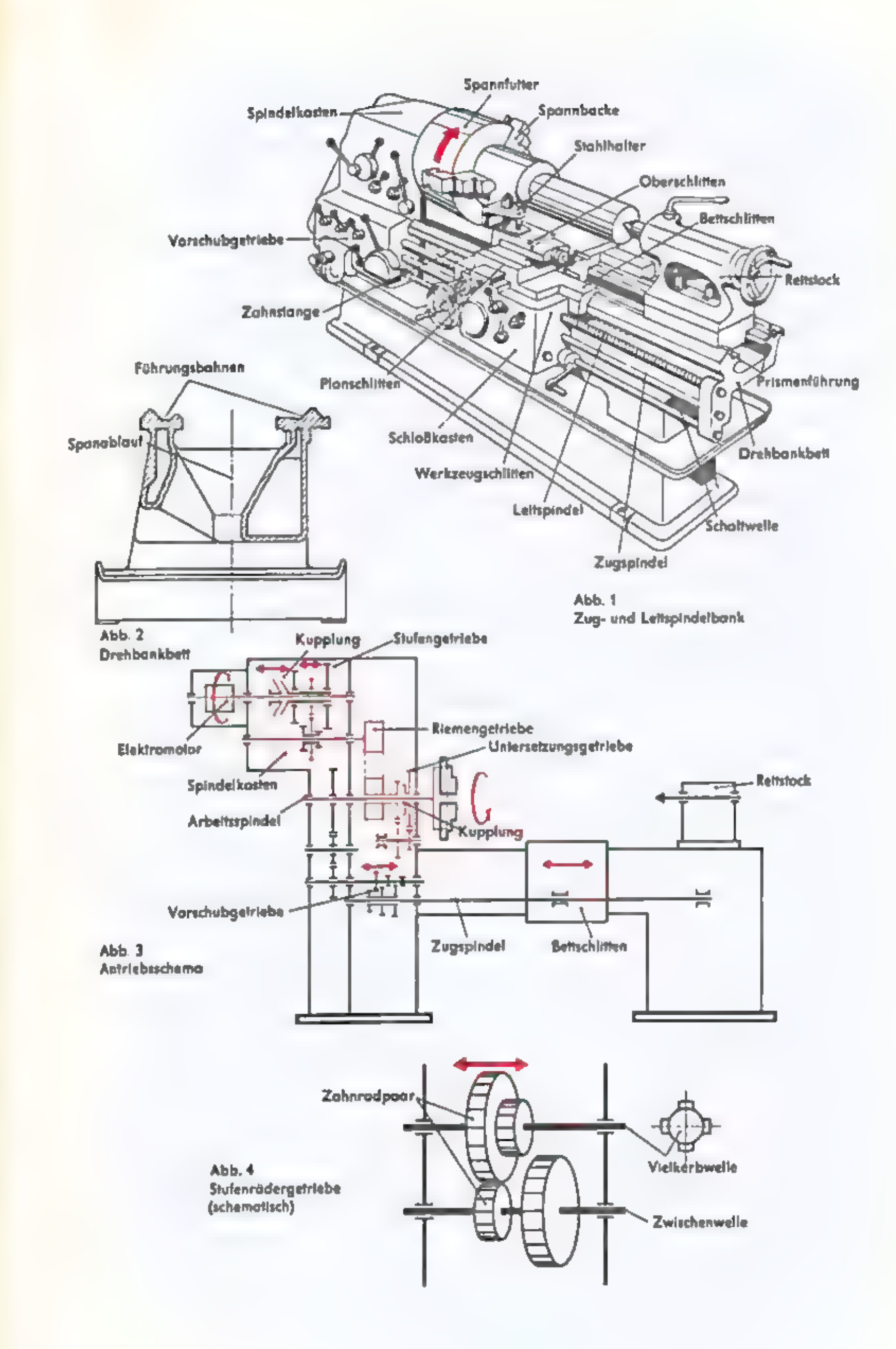


Abb. 1
Zug- und Leitspindelbank

Abb. 2
Drehbankbett

Abb. 3
Antriebsschema

Abb. 4
Stufenrädergetriebe (schematisch)

DREHMASCHINE II

Das Ein- und Ausschalten der Arbeitsspindel erfolgt bei laufendem Motor über eine im Spindelkasten eingebaute Lamellenkupplung. Diese sitzt auf der mit dem Motor verbundenen Eingangswelle und muß daher im Vergleich zur langsamer laufenden Spindel kleinere Drehmomente schalten. Infolge der trägen Masse des Spannfutters und des aufgespannten Werkstückes würde die Arbeitsspindel nach dem Auskuppeln zeitraubend lange auslaufen. Durch eine der Lamellenkupplung nachgeschaltete Lamellenbremse wird die Arbeitsspindel nach dem Abtrennen des Antriebes rasch auf Stillstand abgebremst.

Die Arbeitsspindel ist zur Aufnahme der zu bearbeitenden Drehteile mit einer Spannvorrichtung versehen. Diese muß das Drehteil so zentrieren, daß die Achse des Werkstückes mit der Drehachse der Spindel zusammenfällt. Die Spannvorrichtung hat auch die kraftschlüssige Verbindung zwischen Werkstück und Arbeitsspindel herzustellen. Am häufigsten wird das Dreibackenfutter verwendet. Die Futterbacken lassen sich in den Nuten, die in das Gehäuse des Spannfutters eingearbeitet sind, radial auf den Mittelpunkt zu verschieben. Sie tragen auf ihrer Rückseite eine Art Verzahnung, die in ein auf einer drehbaren Scheibe angebrachtes, spiralförmiges Plangewinde formschlüssig eingreifen. Die Rückseite dieser Scheibe ist mit einer Verzahnung versehen, auf der sich drei im Gehäuse des Futters gelagerte Kegelräder abwälzen. Die Scheibe läßt sich über die Kegelräder verdrehen.

Der Werkzeugschlitten (Abb. 1) nimmt den Drehstahl auf und führt dieses Werkzeug am Drehteil entlang. Er besteht aus einem Unterteil, dem Bettschlitten und aus dem Oberteil, dem Kreuzschlitten. Der Bettschlitten läßt sich auf der Oberseite des Drehbankbettes längs verschieben und wird z. B. durch die auf dem Drehbankbett angebrachten, gleichschenkligen Prismen geführt. Auf dem Bettschlitten ist der Planschlitten angebracht, der es erlaubt, das Oberteil mit dem Drehstahl rechtwinklig zum Drehbankbett zu verschieben. Der Planschlitten gleitet in einer schwalbenschwanzförmigen Führung des Bettschlittens und wird durch eine Spindel (Welle, die ein Gewinde trägt) bewegt. Auf dem Planschlitten ist das Oberteil (Obersupport) aufgebaut. Das Oberteil läßt sich häufig schwenken und nach einer Gradeinteilung auf jeden beliebigen Winkel einstellen. Das Drehteil trägt den über eine weitere Spindel verschiebbaren Kreuzschieber, auf dem die Haltevorrichtung für den Drehstahl angebracht ist.

Der Bettschlitten läßt sich von Hand mittels eines Handrades, aber auch maschinell entlang dem Drehbankbett verschieben. Die mit einem Gewinde versehene Leitspindel wird, vom Spindelkasten aus angetrieben, in Umdrehung versetzt. Die Leitspindel dient z. B. zum Gewindeschneiden. Im seitlich am Bettschlitten angebrachten Schloßkasten befindet sich als Kupplung eine Schloßmutter (Abb. 3). Diese ist längsgeteilt ausgeführt. Klafft sie auseinander, so befindet sich die Leitspindel nicht im Eingriff. Ist sie dagegen geschlossen, stellt sie eine Mutter dar, in der die Leitspindel läuft und so das Drehbankbett verschiebt.

Zum selbsttätigen Lang- und Plandrehen (Abb. 2) ist in der Schloßplatte außerdem die Steuerung für den Langzug des Bettschlittens und für den Planzug des Planschlittens eingebaut. Der Antrieb erfolgt ebenfalls vom Spindelkasten über eine Zugspindel. Diese ist mit einer Längsnut versehen, mit der eine im Schloßkasten angeordnete Schnecke längs verschiebbar, kraftschlüssig verbunden ist. Bei eingeschaltetem Längsvorschub des Bettes (Stellung LV in Abb. 4) werden von der Schnecke das Schneckenrad und das damit verbundene Zahnrad Z_1 und über das schwenkbare Rad Z_2 die Räder Z_3 und Z_4 angetrieben. Z_4 wälzt sich auf einer an dem Maschinenbett angebrachten Zahnstange ab und verschiebt den Bettschlitten längs der Drehbank. Ist dagegen das Rad Z_2 im Eingriff mit Z_5 (Stellung PV), so wird die Spindel des Querschiebers (Planschlittens) angetrieben und dieser bewegt.

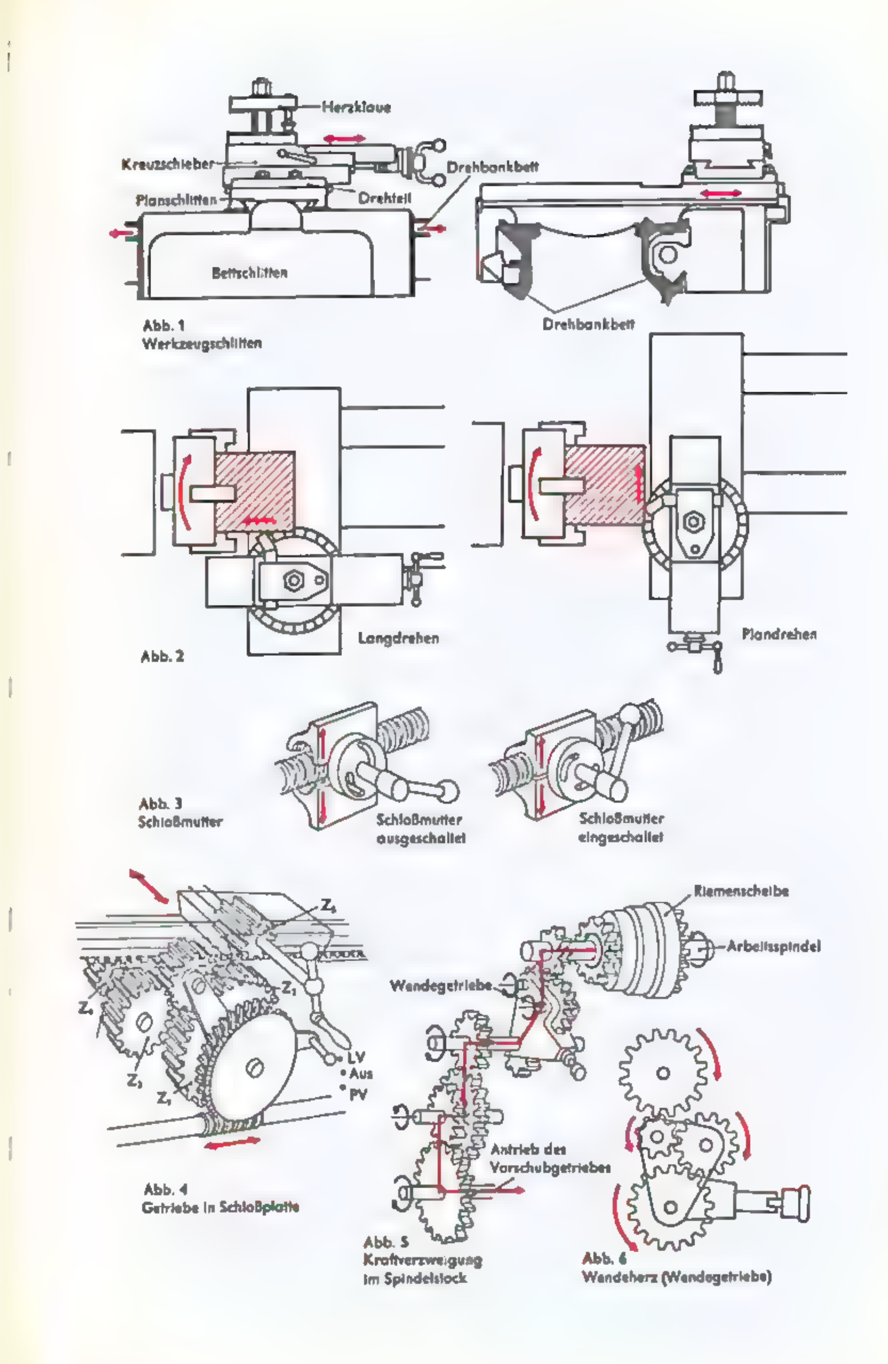


Abb. 1 Werkzeugschlitten

Abb. 2

Abb. 3 Schloßmutter

Abb. 4 Getriebe in Schloßplatte

Abb. 5 Kraftverzweigung im Spindelstock

Abb. 6 Wendeherz (Wendegetriebe)

FRÄSMASCHINEN I

Fräsmaschinen sind Werkzeugmaschinen, auf denen bei der spanenden Bearbeitung eines Werkstückes das Werkzeug, der um seine Längsachse rotierende Fräser, die Hauptbewegung ausführt. Das Werkstück selbst wird meist nur geradlinig bewegt. Bei den einzelnen Fräsmaschinenbauarten ist die Frässpindel je nach der Form, der Lage und der Größe der zu fräsenden Flächen waagerecht oder senkrecht angeordnet. Zum Erzielen der beim Spanen erforderlichen Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück ist bei den Konsolfräsmaschinen der längs und quer verschiebbare Werkstücktisch auf einem in der Höhe verstellbaren Konsol gelagert, wobei die Spindel bei den Waagerecht- und Universalfräsmaschinen waagerecht, bei den Senkrechtfräsmaschinen senkrecht steht. Bei den Bettfräsmaschinen (Plan- oder Langfräsmaschinen) ist der Tisch nur längs verschiebbar. Eine oder mehrere Frässpindeln sitzen in gegebenenfalls mehreren Spindelschlitten, die an einem Ständer, an einem Querbalken oder auch portalähnlichem Gestell verschoben und dadurch in die für die erforderlichen Fräsarbeiten richtige Lage gebracht werden können. Bei der Waagerechtfräsmaschine (Abb. 1) wird die zum Befestigen der Fräswerkzeuge mit einem Außen- und einem Innenkegel versehene, waagerecht gelagerte, robuste Frässpindel durch den Hauptantrieb in Drehung versetzt. Zum Einstellen der richtigen Schnittgeschwindigkeit des Fräsers kann die Drehzahl der Frässpindel durch ein vorgeschaltetes Getriebe (meist Zahnradgetriebe) in verschiedenen Stufen mittels Hebelschaltung eingestellt werden. Das auf dem Frästisch befestigte Werkstück kann durch Verschieben des Winkeltisches in der Höhenlage durch den Querschieber seitlich und mit dem Frästisch selbst in Längsrichtung bewegt werden. Diese drei Bewegungen können durch Drehen an Handkurbeln bzw. -rädern über Gewindespindeln erreicht werden. Auf die Gewindespindel, bei größeren Maschinen auf alle drei Gewindespindeln, kann aber außerdem ein Vorschubgetriebe einwirken, das seinen Antrieb entweder durch einen eigenen Motor oder vom Hauptantrieb erhält. In diesem Vorschubgetriebe können durch Verschieberäder oder über Ziehkeile (s. Drehbank, Vorschubgetriebe) verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten eingestellt werden. Bei der Waagerechtfräsmaschine der Abb. 2 sitzt zwischen Vorschubgetriebe und der Gewindespindel des Frästisches noch ein Schneckengetriebe. Die Verbindung stellt eine ausziehbare Welle her, da sich das Schneckengetriebe mit dem Frästisch bewegt und damit je nach der Stellung des Frästisches veränderliche Entfernung vom Vorschubgetriebe besitzt. Manche Maschinen erlauben auch das Einschalten von Eilgängen zur raschen Bewegung des aufgespannten Werkstücks, wenn außer Eingriff befindliche Fräser schnellstens an die zu bearbeitenden Stellen herangeführt werden sollen. Die Bewegung des Fräsmaschinentisches kann durch eine elektrisch, mechanisch oder hydraulisch arbeitende Abschaltsteuerung dem Arbeitsablauf angepaßt werden.

Die Universalfräsmaschine unterscheidet sich von der Waagerechtfräsmaschine neben größeren Stufengetrieben für den Haupt- und Vorschubantrieb noch dadurch, daß der Tisch zusätzlich noch um eine senkrechte Achse geschwenkt werden kann. Dadurch ist sie vielseitiger verwendbar. Meist ist ihre Tischspindel so angeordnet, daß ihr linkes Ende über Wechselräder mit der Spindel eines Universalteilkopfes (s. S. 254) verbunden und so dessen Spindelbewegung abhängig vom Tischvorschub erfolgen kann (z. B. zum Drallfräsen, d. h. Fräsen von wendelförmigen Nuten auf einer Welle). Die Senkrechtfräsmaschine wird vorwiegend für Stirnfräsearbeiten eingesetzt. Die normalerweise senkrecht stehende Frässpindel kann bei dieser Maschine auch gegebenenfalls geschwenkt und schräggestellt werden. An Sonderbauarten von Fräsmaschinen wären Gewindefräsmaschinen, Zahnradfräsmaschinen und Kopierfräsmaschinen zu nennen. Letztere dienen zum Herstellen von Werkstücken mit unregelmäßig begrenzten Flächen.

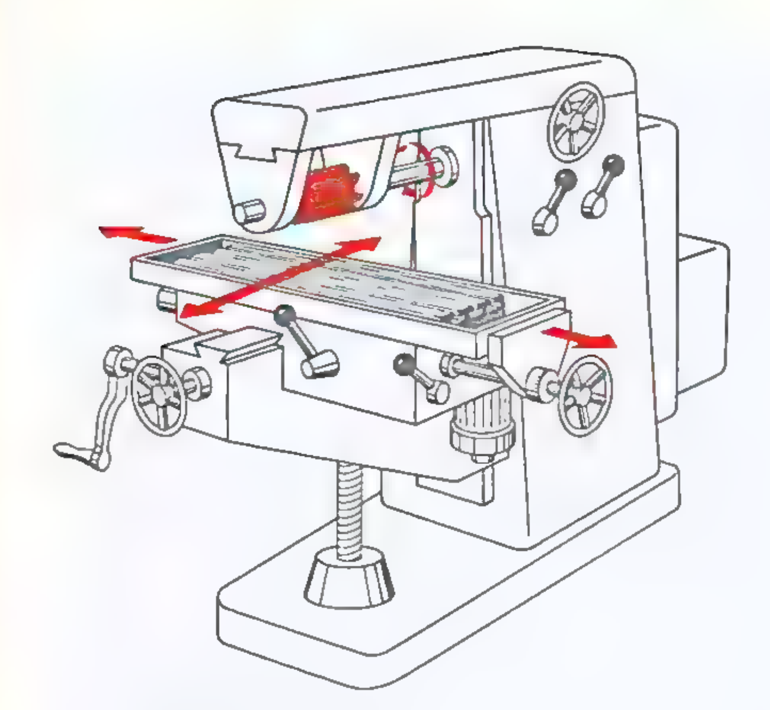


Abb. 1 Waagerechtfräsmaschine

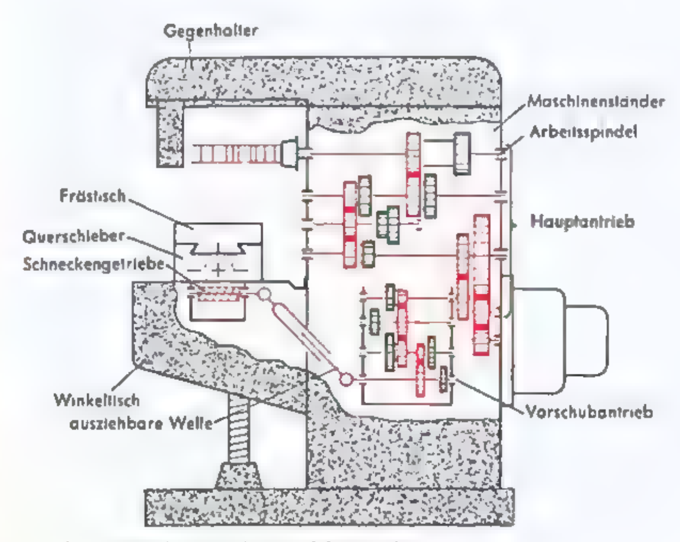


Abb. 2 Hauptteile einer Waagerechtfräsmaschine

FRÄSMASCHINEN II

Teilen bedeutet in der Werkstatt das Schwenken einer Spindel oder Scheibe um den Teilbetrag einer vollen Umdrehung. Derartige Teilaufgaben treten z. B. bei der Herstellung von Verzahnungen (gleichmäßige Verteilung der Zähne auf dem Umfang eines Zahnrades), von Kupplungen (regelmäßige Anordnung von Bohrungen und Aussparungen), beim Fräsen von gleichseitigen Vielecken u. dgl. auf.

Bei einem einfachen Teilgerät (Abb. 1) erfolgt das Schwenken der Teilspindel direkt durch die an ihrem einen Ende sitzende auswechselbare Rastenscheibe, die soviel Einschnitte hat, wie das Werkstück Teilungen erhalten soll. Die Teilscheibe wird nach jeder Verstellung durch eine in die Rastenscheibe einrastende Klinke festgehalten. Man nennt dieses Teilverfahren unmittelbares (direktes) Teilen. Erfolgt das Schwenken der Teilspindel nicht direkt, sondern über zwischengeschaltete Getrieberäder, so spricht man von mittelbarem (indirektem) Teilen. So ermöglicht der allgemein an Fräsmaschinen verwendete Universalteilkopf (Abb. 2) die Ausführung direkter und indirekter Teilverfahren. In optischen Teilköpfen erlaubt dabei eine eingebaute Optik das Ablesen des Teilungsbetrages auf einer genauen Skala. Beim Universal-Teilkopf (Abb. 2) sitzt auf der Teilkopfspindel die Teilscheibe mit 24 Bohrungen, die zum direkten Teilen verwendet werden kann. Sollen z. B. in ein Werkstück sechs Nuten gefräst werden, so muß nach jedem Fräsdurchgang das Werkstück um $\frac{1}{6}$ gedreht werden. Dies bedeutet, daß man den Stift in jedes vierte Loch einrasten läßt. Mit dem direkten Teilverfahren lassen sich nur wenige Teilungen herstellen, nämlich diejenigen, die in der Zahl 24 als ganzzahlige Faktoren enthalten sind (2, 3, 4, 6, 8, 12).

Wesentlich mehr Teilmöglichkeiten ergeben sich, wenn die Teilspindel durch die Handkurbel über das zwischengeschaltete Schneckengetriebe verdreht und so indirekt geteilt wird. Das Schneckengetriebe besitzt üblicherweise eine Übersetzung 40 : 1, d. h. 40 volle Umdrehungen der Handkurbel und damit der Schnecke ergeben nur eine Umdrehung am Schneckenrad und damit an der Teilspindel. Mit Hilfe eines Haltestiftes an der Kurbel, der in die Löcher von auswechselbaren Lochscheiben einrasten kann, können dabei auch Teilbeträge voller Umdrehungen an der Handkurbel eingestellt werden, die sich an der eigentlichen Teilspindel wegen des zwischengeschalteten Schneckengetriebes aber immer nur mit ihrem 40. Teil auswirken. Übliche Lochzahlen dieser Lochscheiben können aus der Abb. 3 entnommen werden. Soll z. B. eine Teilung mit der Teilzahl 25 hergestellt werden, so müssen, da 40 volle Umdrehungen der Handkurbel eine ganze Umdrehung der Teilspindel ergeben würden, an der Handkurbel nur $\frac{40}{25}$ Umdrehungen, das sind $1\frac{15}{25} = 1\frac{3}{5}$ Umdrehungen = = 1 volle und $\frac{3}{5}$ Umdrehungen an der Handkurbel. Zur Einstellung von $\frac{3}{5}$ Umdrehungen benutzt man eine Lochscheibe, deren Lochzahl durch 5 teilbar ist, z. B. die Lochscheibe mit 15 Löchern. Auf dieser muß man dann, um $\frac{3}{5}$ Umdrehungen der Handkurbel zu erreichen, $\frac{3}{5}$ von 15, d. h. 9 Löcher, weitergehen. Um sich das wiederholte Abzählen zu ersparen, ist an der Lochscheibe eine sogenannte Schere angebracht, deren Weite einmal auf die gewünschten 9 Löcher eingestellt wird. Ist die erste Fläche gefräst, so wird bei der Teilzahl 25 die Kurbel einmal ganz herum und 9 Lochabstände weitergedreht. Dann wird die Schere bis zum Stift nachgeschlagen (Abb. 4).

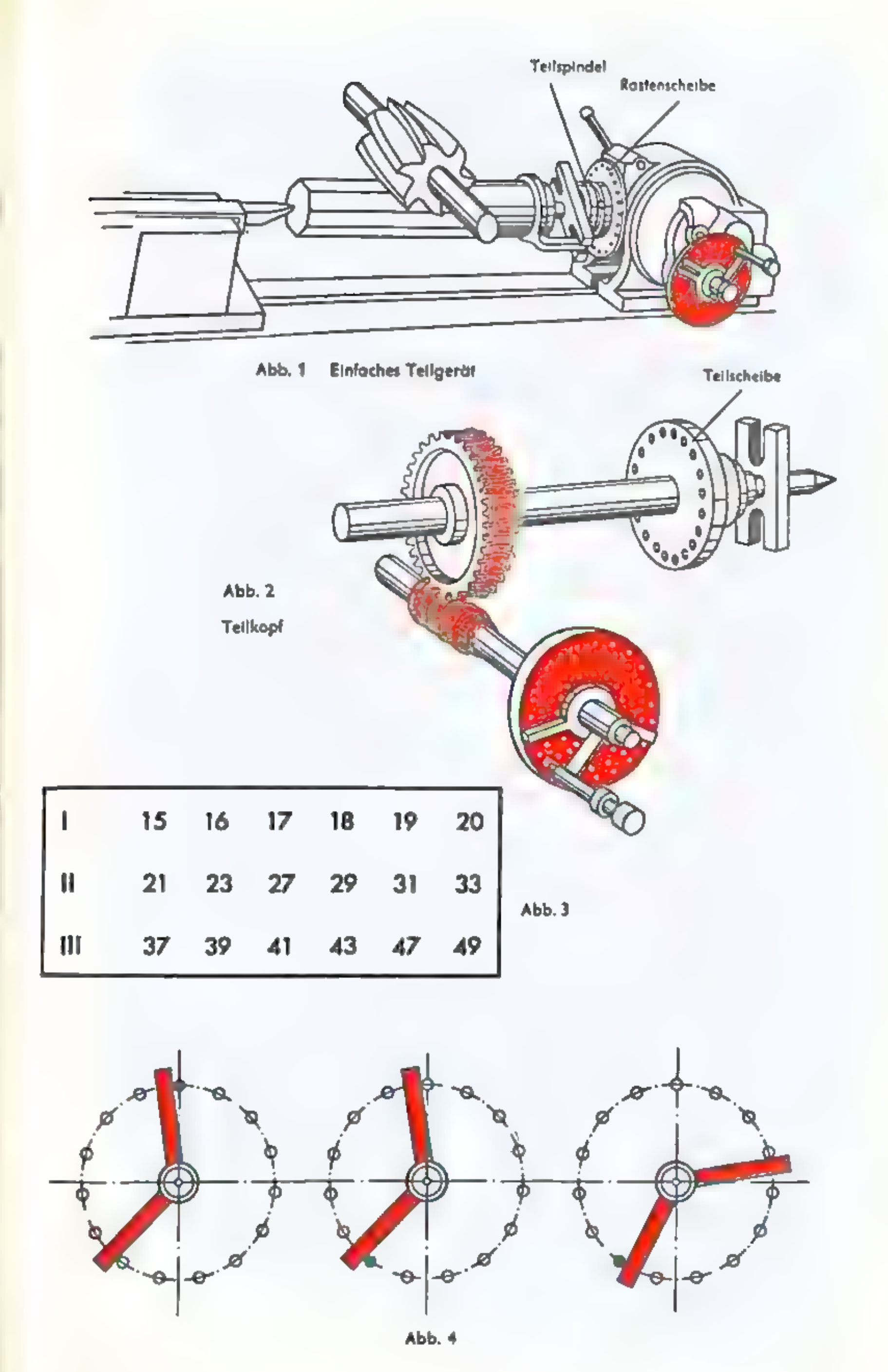


Abb. 1 Einfaches Teilgerät

Abb. 2 Teilkopf

I	15	16	17	18	19	20
II	21	23	27	29	31	33
III	37	39	41	43	47	49

Abb. 3

Abb. 4

PRESSEN

Mit Hilfe von Pressen kann Verformungsarbeit an Werkstücken geleistet werden, indem man einen großen Druck auf sie ausübt. Nach ihrer Bauart unterscheidet man hydraulische und mechanische Pressen. *Hydraulische Pressen* benutzen als Triebmittel ein Gas oder eine Flüssigkeit (meist Wasser). Ihrer Wirkungsweise liegt ein Naturgesetz zugrunde, nach dem der Druck eines in einem Zylinder komprimierten flüssigen oder gasförmigen Mediums an allen Stellen des Zylinders gleich groß ist. Druck ist die Wirkung einer Kraft auf eine Fläche. Wenn man nach Abb. 1 mit einem kleinen Kolben in einem kleinen Zylinder an einer Seite des Druckraumes die Flüssigkeit zusammenpreßt und die andere Seite des Druckraumes mit einem großen Kolben abschließt, so hat man folgende Verhältnisse: Auf der einen Seite wirkt eine kleine Kraft auf eine kleine Fläche und erzeugt einen bestimmten Druck. Auf der anderen Seite wirkt dieser Druck auf eine große Fläche. Vom großen Kolben kann man also eine große Kraft abnehmen (denn wenn Druck gleich Kraft pro Flächeneinheit ist, dann ist auch Kraft gleich Druck mal Flächeneinheit). Das Volumen, das bei diesen Vorgängen verdrängt wird, ist jedoch auf beiden Seiten gleich; der kleine Kolben muß ein großes Stück vorrücken, damit der große Kolben ein kleines Stück vorwärtsbewegt wird. Zum Antrieb von hydraulischen Pressen verwendet man anstelle eines einzigen kleinen Kolbens meist deren drei, die nacheinander Wasser in den Zylinder pressen. Damit die damit verbundene stoßweise Strömung nicht auf den Preßzylinder übertragen wird, ist in der Druckseite der Leitung ein Puffergefäß eingebaut, das teilweise Luft enthält (Abb. 2). Dieses Luftvolumen wirkt wie ein Polster: Es nimmt zunächst den Druck in der Leitung an. Bei plötzlichen Druckspitzen wird es noch weiter zusammengepreßt und baut damit die Druckspitzen ab. Umgekehrt kann es, wenn die Fördermenge des Kolbens bei kurzzeitigem hohem Flüssigkeitsbedarf nicht ausreicht, durch eigene Entspannung Flüssigkeit in die Leitung drücken.
Wird die Wasserpreßpumpe in Betrieb genommen, so füllt diese den Preßzylinder mit Wasser und erzeugt hier einen Druck, wodurch der Preßstempel abwärts bewegt wird und auf das Werkstück eine Kraft ausübt. Zum Zurückziehen des Preßstempels werden zwei kleine Kolben benutzt, auf die Preßwasser von niedrigerem Druck wirkt.
Zum Antrieb der *mechanischen Pressen* dienen verschiedene Systeme. Bei der Spindelpresse (Abb. 3a) wird durch Drehung einer mit Schraubengewinde versehenen Spindel in einer feststehenden Mutter eine Kraft erzeugt, mit der die Unterseite der Spindel auf das zu bearbeitende Werkstück drückt. Einfache Spindelpressen tragen am oberen Ende der Spindel ein Handrad (Abb. 3b), mit dessen Hilfe die Spindel gedreht wird.
Bei größeren Pressen sitzt am oberen Ende der Spindel ein großes Schwungrad, d. h. ein großes Rad mit großer Schwungmasse, das – in Drehung versetzt – eine hohe Energie speichern kann. Die gespeicherte hohe Drehenergie wird über die Spindel auf das Werkstück übertragen und dort in Verformungsarbeit umgesetzt. Das Schwungrad wird durch ein Reibrad angetrieben. Zum Zurückziehen dient ein weiteres Reibrad, welches das Schwungrad entgegengesetzt antreibt (Abb. 3a).
Eine weitere Abart der mechanisch angetriebenen Pressen sind die Exzenter- (Abb. 4) und die Kurbelpressen (Abb. 5). In beiden Fällen wird ein Schwungrad von großem Durchmesser von einer Antriebsmaschine angetrieben. Die am großen Umfang dieses Rades wirkende verhältnismäßig kleine Kraft und die bei Verformung des Werkstückes infolge Abbremsen des Schwungrades freiwerdende Drehenergie erzeugen an der Welle ein Drehmoment, das an dem kleinen Halbmesser des Exzenters bzw. der Kurbel eine verhältnismäßig große Kraft entstehen läßt.

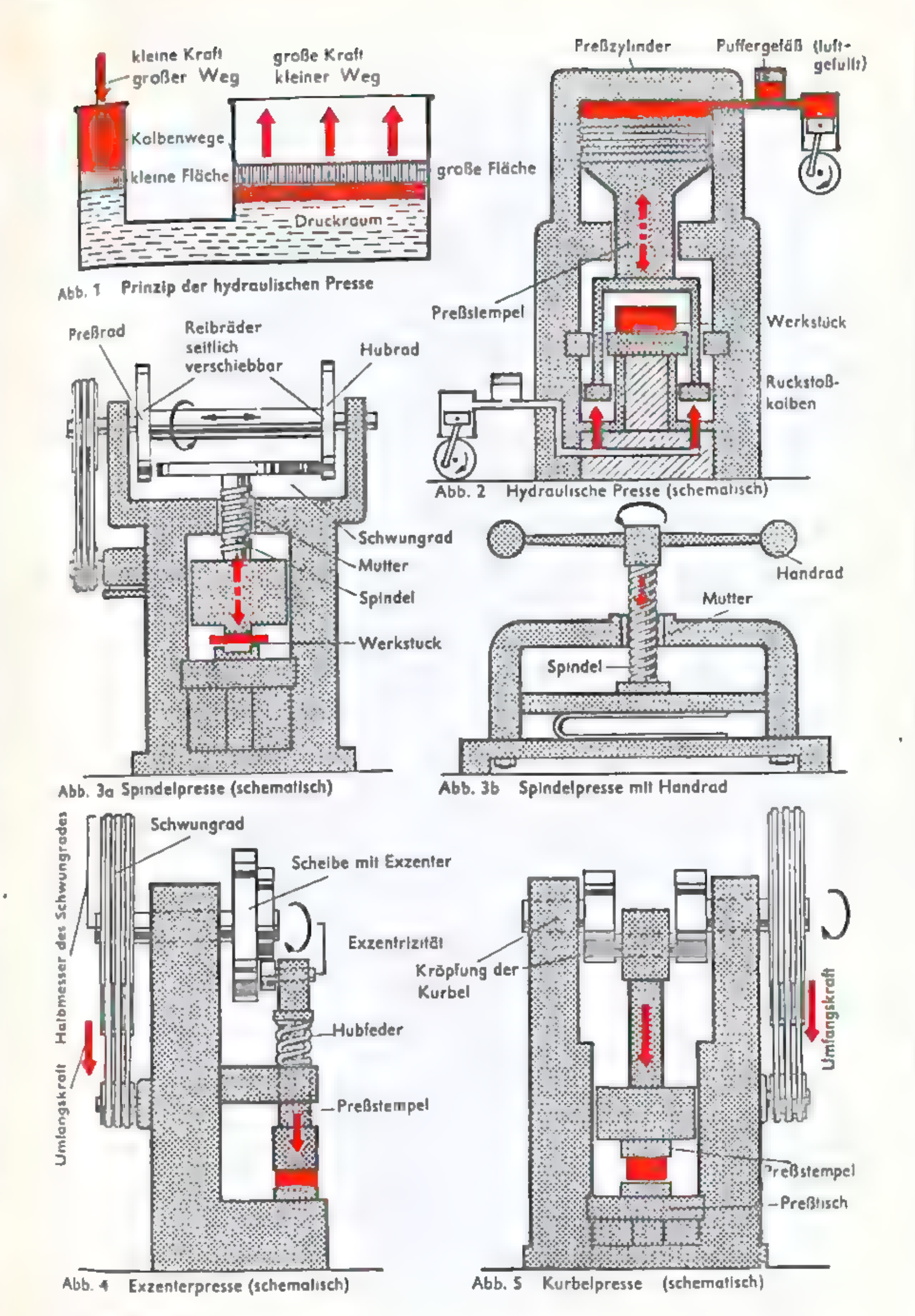


Abb. 1 Prinzip der hydraulischen Presse

Abb. 2 Hydraulische Presse (schematisch)

Abb. 3a Spindelpresse (schematisch)

Abb. 3b Spindelpresse mit Handrad

Abb. 4 Exzenterpresse (schematisch)

Abb. 5 Kurbelpresse (schematisch)

DAS MAUERN

Mauersteine sind den Menschen seit Jahrtausenden bekannt, noch heute können wir gemauerte Bauwerke der alten Ägypter, Babylonier, Griechen und Römer bewundern. Die Herstellung von gebrannten Mauersteinen, vor allem von Ziegelsteinen, wurde in ganz Europa von den Römern übernommen.

Mauern bedeutet Herstellung von Baukörpern aus Stein, Stampf- oder Gußmasse. Zum Mauern selbst werden an wichtigsten Werkzeugen die Kelle (zum Verarbeiten des Mörtels), das Senklot (zum senkrechten Hochführen der Mauern), der Maurerhammer (zum Bearbeiten der Steine) und evtl. die Wasserwaage (zum Nachprüfen der Waagerechten und Senkrechten) benötigt. Die Baukörpergröße und -ausführung muß sich nach der Beschaffenheit, der Höhe, der Belastung und der Festigkeit des verwendeten Baustoffes richten. Die Mauern eines Gebäudes sollen genügend standsicher sein und ausreichenden Wärme-, Feuchtigkeits-, Schall- und Feuerschutz aufweisen. Die Mindestdicke belasteter Außenwände ist bis auf wenige Ausnahmen (z. B. Fachwerkwände) auf 24 cm festgelegt. Unterschieden wird je nach verwendetem Baustoff und Ausführung zwischen folgenden Mauerarten:

1. Mauerwerk aus natürlichen Steinen (Bruchstein-, Schicht-, Zyklopen-, Quader- und Mischmauerwerk; vgl. Abb. 1);
2. Ziegelmauerwerk (aus Poren-, Langloch-, Hochloch-, Voll- und Vormauerziegeln sowie aus Klinkern; Formate und Formatverhältnisse vgl. Abb. 2);
3. Mauerwerk aus Beton oder Betonsteinen (wie Bims-, Steinkohlenschlacken-, Ziegelsplittbeton- und Leichtbetonhohlblock-, Leichtbetonvoll-, Gasbeton- und Schaumbetonsteinen);
4. Leichte Trennwände (wie Stahlstein-, Glasstein-, Rabitz-, Platten- und Gerippewände; vgl. Abb. 6);
5. Sondermauerwerk (wie Kamine und Schornsteine).

Beim Mauerwerk aus natürlichen Steinen muß auf guten Steinverband und vor allem auf schichtgerechtes Mauern geachtet werden, d. h., die Steine sollen so vermauert werden, wie sie in der Natur gelagert sind, damit sie ein schönes und den statischen Erfordernissen entsprechendes Mauerwerk ergeben (Abb. 1). Die Fugen sollen höchstens 3 cm dick sein; als Mörtel eignet sich Kalk- oder Kalkzementmörtel am besten.

Ziegelmauerwerk muß nach bestehenden Verbandsregeln ausgeführt werden; die wichtigsten Verbände sind der Block- und der Kreuzverband (Abb. 3 u. 4). Mauerziegel werden aus Ton, Lehm oder tonigen Massen gebrannt. Sind die Ziegel frostbeständig, heißen sie Vormauerziegel, sind sie bis zur Sinterung gebrannt und frostbeständig, so heißen sie Klinker (diese müssen außerdem ein Raumgewicht vor rd. 1,9 kp/dm^3 und eine Druckfestigkeit von 350 kp/dm^2 haben).

Für Bauwerke, die eine ausreichende Wärmedämmung erfordern (Wohnungsbau) und die schnell und preiswert ausgeführt werden sollen, finden z. B. Leichtbeton-, Schaumbeton- und Gasbetonsteine Verwendung. Allgemein nennt man diese Steine Hohlblocksteine. Sie besitzen Luftkammern und sind verhältnismäßig groß (Abb. 5). Die porigen mineralischen Zuschlagstoffe gewährleisten eine gute Wärmedämmung (s. S. 268).

Leichte Trennwände müssen mit den umgebenden Bauteilen standsicher verbunden werden. Dies geschieht durch Schlitze oder Verankerung der Bewehrung des anliegenden Bauteils. Die Wanddicken ohne Putz betragen zwischen 5 und 11,5 cm.

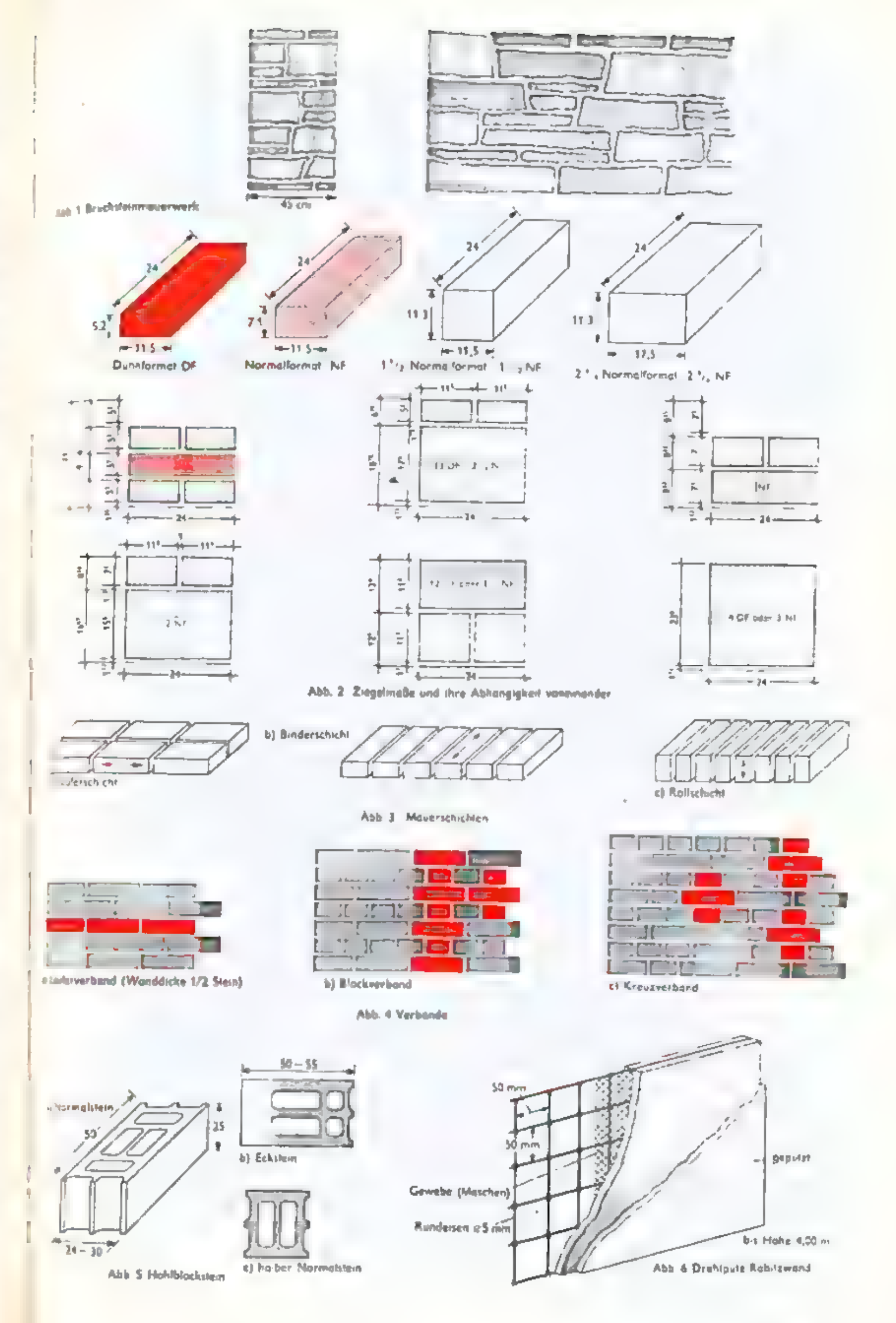


Abb. 1 Bruchsteinmauerwerk

Abb. 2 Ziegelmaße und ihre Abhängigkeit voneinander

Abb. 3 Mauerschichten

Abb. 4 Verbände

Abb. 5 Hohlblockstein

Abb. 6 Drahtputz-Rabitzwand

DACHKONSTRUKTIONEN

Dächer bilden den oberen Abschluß von Bauwerken und schützen vor Witterungseinflüssen wie Niederschlag, Wind, Kälte und Hitze. Sie bestehen aus den tragenden Teilen und der Dachhaut. Die wichtigsten tragenden Teile sind Sparren und Pfetten als Teile des Binders (Abb. 1 und 2). Sie werden in ihrer Ausbildung wesentlich bestimmt vom Material (z. B. Holz, Stahl, Stahlbeton), von Dachneigung, Dachhautart und -gewicht sowie von der Belastung (wie z. B. Schnee). Bei Wohnbauten sind die günstigsten Abmessungen für Sparren rd. 4 m freitragender Länge bei einem Abstand von 0,80 bis 1,00 m voneinander, für Schalung etwa 24 mm Dicke, für Latten ein Querschnitt von 3 cm × 5 cm oder 4 cm × 6 cm bei 6 bis 7 m Länge, für Binderabstände etwa 5 m.

Die Dachneigung ist oft durch baupolizeiliche Bestimmungen vorgeschrieben, sonst ist sie abhängig von der Dachhautbeschaffenheit und der Dachdeckungsart.

Das vom Zimmermann hergestellte Holzdach hat die weiteste Verbreitung. Dachkonstruktionen aus Stahl oder Stahlbeton sind in ihrer Form und Wirkungsweise denen aus Holz ähnlich.

Die Holzdachtragwerke lassen sich in Pfettendächer und Sparrendächer unterteilen.

Die *Pfettendächer* (Abb. 1) bestehen aus Pfetten mit darauf frei aufliegenden Sparren. Die Sparren wirken wie einfache, auskragende oder durchlaufende Balken, die überwiegend auf Biegung beansprucht werden. Die Pfetten werden in bestimmten Abständen aufgelagert (z. B. auf Binder), außerdem müssen sie konstruktiv in Längsrichtung (z. B. durch Kopfbänder) und in Querrichtung (z. B. durch die Binder) ausgesteift werden.

Beim einfachen Pfettendach ohne Streben für kleine Hausbreiten (< 10 m) sind die Sparren bei der Fußpfette fest aufgelagert, beim abgestrebten Pfettendach für größere Hausbreiten und Dachneigungen über 40° sind die Sparren bei der Mittel- oder Firstpfette aufgelagert.

Sparrendächer (Abb. 2) bestehen aus einer Folge von dreieckförmigen Bindern, die aus den gelenkig miteinander verbundenen Sparren und Deckenbalken aufgebaut sind. Die Abstände der einzelnen Binder sind abhängig von der Balkenlage.

Für kleine Hausweiten genügt das reine Sparrendach, während für größere Hausweiten durch Einfügen eines oder mehrerer Riegel (Kehlbalken) das *Kehlbalkendach* entsteht. Kehlbalken können verschiebbar oder unverschiebbar eingebaut werden. Neben den Pfetten- und Sparrendächern gibt es noch einige Sonderformen, z. B. Pultdächer (Abb. 3) oder Shed- bzw. Sägedächer (Abb. 4).

Bei der Berechnung von Dächern sind die Lasten aus Eigengewicht (ständige Lasten), aus Schnee, aus Wind und aus Verkehr (Begehen von Dächern) zu berücksichtigen. Die ständigen Lasten setzen sich aus den Eigengewichten der Dachhaut, der Sparren, Pfetten und Binder zusammen, sie wirken stets lotrecht. Die Schneelasten sind je nach Dachneigung von 75 kp/m² (für Neigung von 20°) bis 0 kp/m² (für Neigung von 60°) verschieden, auch sie wirken lotrecht. Die Windlasten wirken senkrecht auf die Dachfläche, während die Verkehrslasten wieder lotrecht wirken.

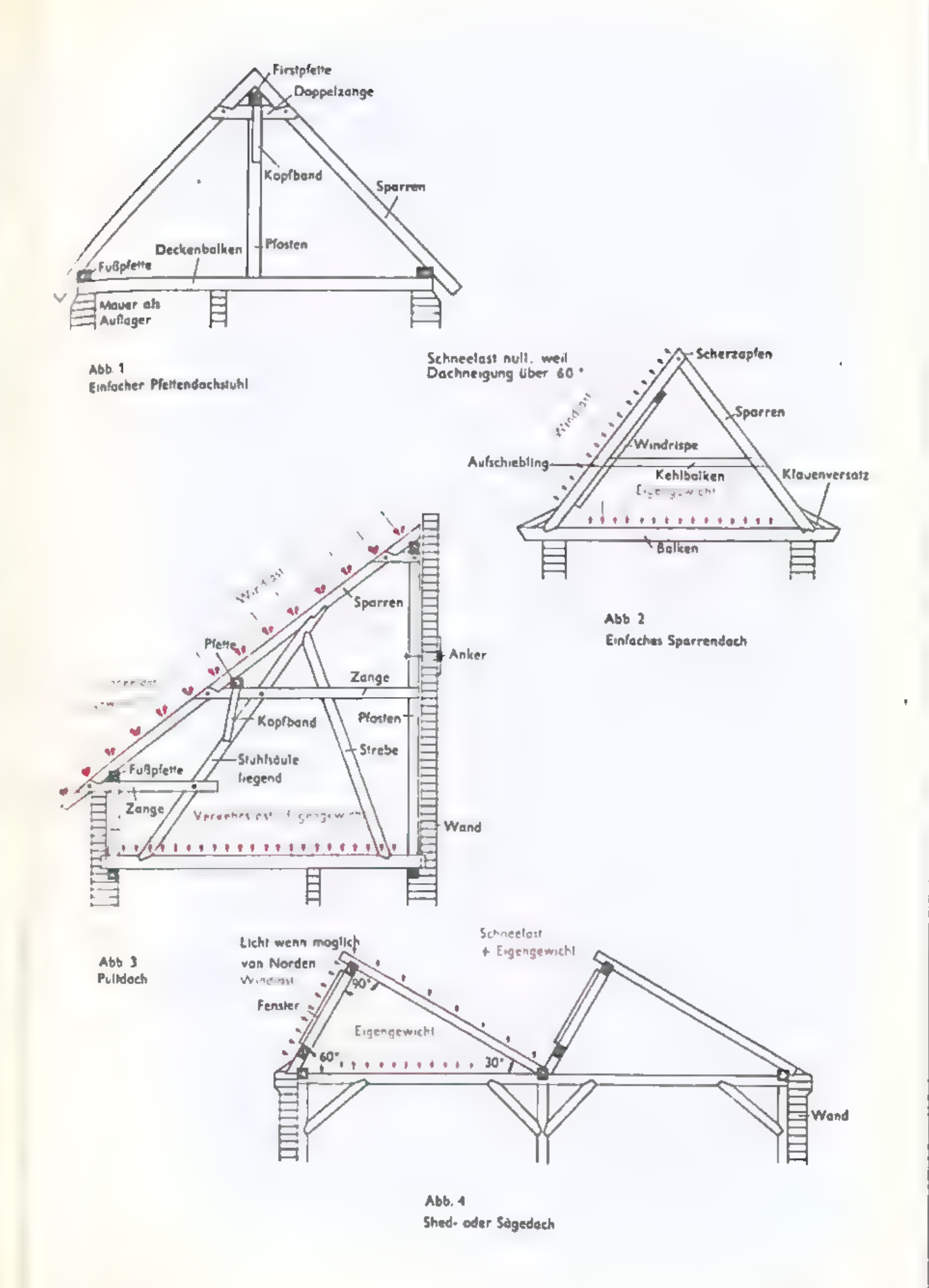


Abb. 1 Einfacher Pfettendachstuhl

Abb. 2 Einfaches Sparrendach

Abb. 3 Pultdach

Abb. 4 Shed- oder Sägedach

STRASSENBAU

Der Straßenbau beschäftigt sich mit der Herstellung von Straßenbauwerken auf dem anstehenden Boden (Untergrund) mit geschütteten Dämmen als Unterbau und der eigentlichen Fahrbahnkonstruktion (bestehend aus der unteren Tragschicht und der Fahrbahndecke) als Oberbau.
Untergrund: Die *Frostsicherheit* eines Bodens wird nach Kornverteilungskurven beurteilt; insbesondere Böden mit mehr als 5 bis 10 % Korndurchmesser ≦ 0,02 mm sind frostgefährlich. Bei nicht frostsicherem Untergrund ist eine kapillarbrechende Frostschutzschicht aus Kiessand vorzusehen, die dann zugleich untere Tragschicht ist. Je nach Höhe des Porenvolumens und des Wassergehalts ist jede Bodenart bei Belastungen Setzungen unterworfen.
Fahrbahnkonstruktion: Die Fahrbahn baut sich über dem Untergrund aus Oberbau (Straßendecke, obere und untere Tragschicht) und Unterbau (verbesserte Untergrundschicht und eventueller Frostschutzschicht) auf (Abb. 1). Der Unterbau wird in flexibler oder starrer Bauweise hergestellt. Zur flexiblen Bauweise zählen die Packlage (Schüttung von Naturstein und anschließende Verdichtung unter Zugabe von Sand und Splitt oder Zementmörtel), Kiesunterbau (zwei Schichten von je 10 cm, festgewalzt), mechanische Bodenverfestigung (Walzen einer in Laborversuchen ermittelten Mischung der Erdarten), Bodenvermörtelung mit Bitumen u. a. Bei der starren Bauweise wird der Unterbau durch Zusatz von Zement zum entstehenden Boden verfestigt. Die Dicke dieser Schicht beträgt ca. 15 cm. Eine Zugabe von Splitt oder Kies dient der zusätzlichen Verfestigung. Verdichtet wird hier mittels Walzen oder Rüttler. Der Oberbau wird heutzutage vorwiegend aus Bitumen oder Beton hergestellt.
Makadamprinzip: Das Gesteinsgerüst wird aus grobkörnigem, gebrochenem Gestein mit vielen Hohlräumen gefertigt. Die dabei auftretende Verzahnung und Verspannung der Körner untereinander gewährleistet eine gute Standfestigkeit. Mit bituminösen Bindemitteln wird das Gerüst fest verklebt und wasserunempfindlich gemacht.
Betonprinzip: Mineralmassen aus Splitt, Sand und Gesteinsmehl werden so geschüttet, daß nur geringe Hohlräume bleiben. Dem Mineralgemisch wird dann in heißem Zustand ein dünnflüssiges bituminöses Bindemittel zugemischt, das die einzelnen Teilchen mit einem Film umhüllen und noch vorhandene Hohlräume ausfüllen soll. Nach Zusammensetzung des Mineralgemisches und Art des Bindemittels unterscheidet man: Sandasphalt, Asphaltfeinbeton (s. Abb. 2), Teerbeton, Asphaltgrobbeton (Abb. 3), Teerasphaltbeton.
Gußasphalt: Ein Gemisch von abgestuftem Mineral und Bitumen wird heiß eingebaut. Dabei wird mit Bitumenüberschuß gearbeitet, der durch hohen Füllergehalt ausgeglichen wird.
Der Fahrbahnoberbau (s. Abb. 4) aus Zementbeton wird in folgender Weise gefertigt: Auf dem Planum werden 75 cm breite Betonrandstreifen oder eine seitliche Schalung mit Laufschienen verlegt. Danach wird das Planum eingeebnet, verdichtet und mit einer ca. 4 cm starken Kiesschicht versehen. Auf diese dicht gerüttelte und geebnete Schicht werden Papierbahnen aufgebracht, die der Reibungsminderung zwischen Unter- und Oberbau dienen. Dann folgt der in der Mischmaschine aufbereitete Beton. Er wird meist in zwei Schichten eingebracht, wobei die 15 cm starke Unterschicht aus nicht verschleißfestem Grobbeton besteht, in den die Stahleinlagen verlegt werden und die 5 bis 7 cm starke Querschicht von verschleißfestem, feinerem Beton gebildet wird. Der vom Mischer kommende Beton wird mittels Betonverteiler (schienenfahrbare Brückenkonstruktion mit Verteiler- und Vorverdichtungseinrichtung) gleichmäßig über die ganze Fahrbahnbreite verteilt und vorverdichtet und vom Betondeckenfertiger (schienenfahrbare Brückenkonstruktion mit Abgleichwalze, Rüttelbohle und Rüttelglättbohle) feinabgeglichen, verdichtet und oberflächenbehandelt.

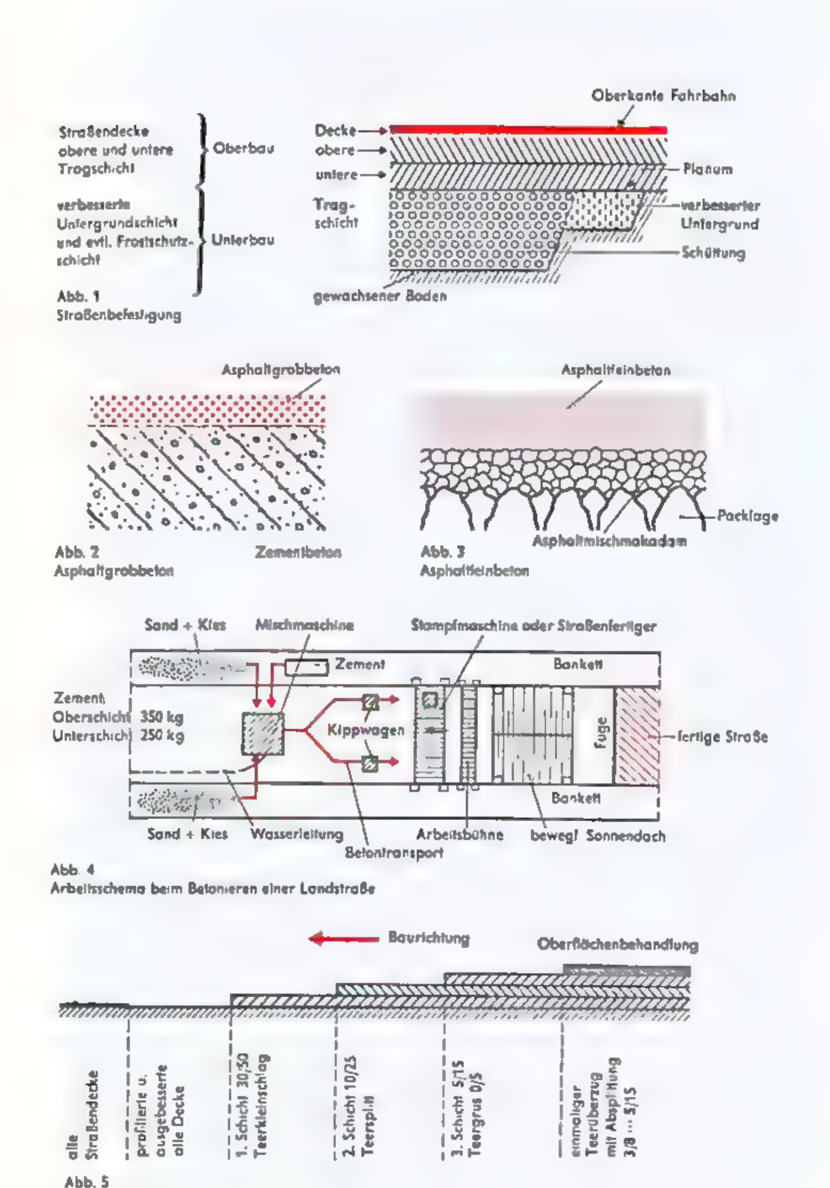


Abb. 1
Straßenbefestigung

Abb. 2
Asphaltgrobbeton

Abb. 3
Asphaltfeinbeton

Abb. 4
Arbeitsschema beim Betonieren einer Landstraße

Abb. 5
Bau einer Mischmakadamdecke

GLEISANLAGENBAU

Linienführung: Mit steigender Fahrgeschwindigkeit der Eisenbahn wird die Trassierung einer Strecke immer kostspieliger. Bei der Richtungs- und Höhenänderung sind bestimmte Zusammenhänge zu beachten. Bei lokomotivbefahrenen Schnellbahnstrecken darf die Steigung 10 ‰, bei den übrigen Hauptstrecken 25 ‰ und bei den Nebenbahnlinien 40 ‰ nicht überschreiten. Der Richtungsänderung kommt besondere Bedeutung zu. Bei einer zulässigen Seitenbeschleunigung von 0,85 m/s^2 und einer Überhöhung der bogenäußeren Schiene von 150 mm sind in Abhängigkeit des Bogenhalbmessers (R) folgende Geschwindigkeiten (v) erlaubt: bei $R = 1080$ m $v = 160$ km/h, bei $R = 1690$ m $v = 200$ km/h, bei $R = 2650$ m $v = 250$ km/h.

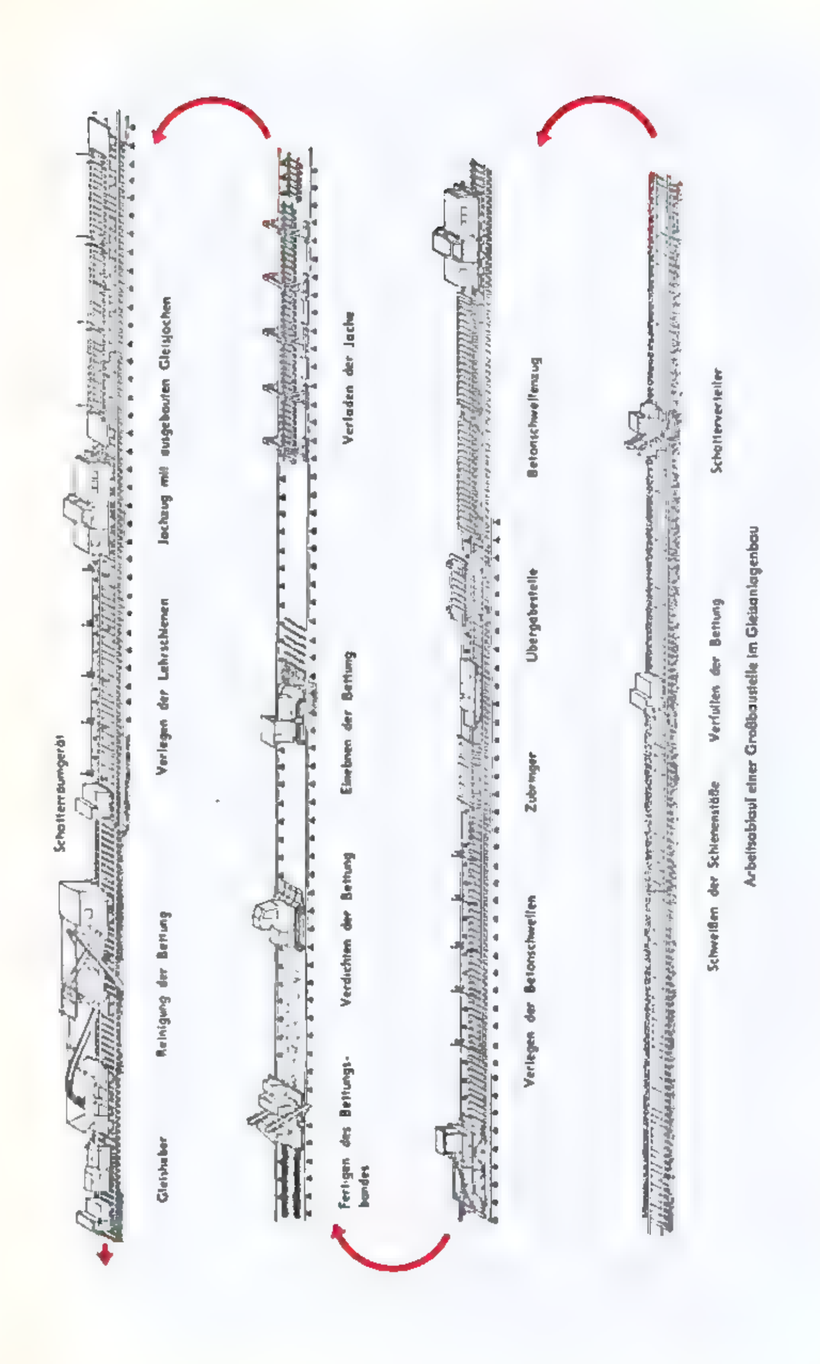
Unterbau: Der Teil des Bahnkörpers, der Gleis und Bettung aufnimmt, der Unterbau, besteht aus der planierten Streckenführung. Um Nach- oder Abrutschen der Erde zu verhindern, ist die Böschung von Einschnitten oder Dämmen mit einer Neigung von 1 : 1,5 ausgeführt und zum Schutz gegen den Angriff von Wasser, Frost und Wind mit Rasen befestigt.

Die *Unterbaukrone* (Planum), die Oberfläche des Unterbaus, ist zum Ableiten des Regen- und Schmelzwassers dachförmig geneigt. Das Wasser wird in Gräben abgeleitet, die beiderseits des Bahnkörpers entlangführen. Um die nachträgliche Abnahme der Tragfähigkeit des Unterbaus durch eindringendes Wasser zu verhindern, wird das Planum entweder mit einem bituminösen Überzug versehen oder mit endlos verschweißter Kunststoffolie bedeckt. Die Breite der Unterbaukrone gerader eingleisiger Bahnlinien beträgt 6 m (Abb. 1), gerader zweigleisiger Strecken 10 m, wobei der Abstand der beiden Gleisachsen 4 m betragen soll.

Oberbau: Unter *Oberbau* versteht man die Gleisbettung und Gleisanlage, die sich auf der Unterbaukrone auflagert. Der lichte Abstand zwischen den beiden Schienenköpfen eines Gleises, die Spurweite, beträgt in Mitteleuropa einheitlich 1435 mm (*Regel-Vollspur* oder *Normalspur*).

Die Querneigung der Schiene im Gleis beträgt 1:40. Um die Fliehkraft bei Kurvenfahrt weitgehend auszugleichen, erhält das Gleis im Bogen eine Querneigung. Die *Überhöhung* des bogenäußeren Gleises beträgt minimal 20 mm, maximal 150 mm. Zwischen der Geraden und dem Kreisbogen wird ein *Übergangsbogen* angeordnet, um die Krümmung und damit die Seitenbeschleunigung stetig anwachsen zu lassen.

Gleisbau. Die vom Eisenbahnfahrzeug ausgeübten Kräfte werden über die Schienen, Befestigung, Schwelle, Bettung auf den Untergrund abgeleitet. In Schweißwerken werden die Schienen mit elektrischer Stumpfschweißung auf 120 m Länge gebracht. Nach dem Einbau im Gleis erfolgt das Verschweißen der Stoßstellen nach dem Thermitverfahren ohne Wulst (SoW-Verfahren). Bei der DB werden weitgehend imprägnierte *Holzschwellen* mit abgebundenen Schwellenenden und vorgespannte *Betonschwellen* der Form B 58 verlegt. *Stahlschwellen* werden nicht mehr neu beschafft. Als Hölzer finden Buche, Eiche und in stark beanspruchten Gleisen Tropenhölzer wie Bongossi Verwendung. Die *Querschwelle* ist ein auf Druck und Biegung beanspruchter Balken, der hohe Druck- und Biegezugfestigkeiten aufweisen muß. Da Beton aber zur verhältnismäßig hohen Druckfestigkeit nur eine sehr niedrige Zugfestigkeit besitzt, ist er durch eine Stahlbewehrung und durch dessen Vorspannung einer so hohen Druckspannung auszusetzen, daß schädliche Biegezugspannungen nicht auftreten können. Die Betonschwellenform 58 (Abb. 4) entspricht am besten der Forderung nach dauerhafter Gleislage in Höhen und Seitenrichtung. Die mit einem Abstand von 63, 60 und bei Schnellfahrstrecken von 58 cm verlegten Querschwellen sind mittels der *Schienenbefestigungen* kippsicher mit den Schienen zu einem winkelsteifen Gleisrahmen verbunden.



Arbeitsablauf einer Großbaustelle im Gleisanlagenbau

GRUNDBAU

Mit Grundbau bezeichnet man all die Baumaßnahmen, die erforderlich sind, um Bauwerke (insbesondere Hochbauten und Tiefbauten, aber auch Erdbauten und Straßenkörper) zu gründen. Zweck der *Gründung* ist es, die aus dem Bauwerk herrührenden Lasten und Kräfte so in den Baugrund abzuleiten, daß für das Bauwerk die Standsicherheit gewährleistet ist. Die Kraftübertragung zwischen Bauwerk und Baugrund vermittelt das Grundbauwerk.

Es gibt verschiedene Systeme von Grundbauwerken. Die einfachste Konstruktion ist die Verbreiterung einer tragenden Wand durch einen *Fundamentstreifen* (s. Abb. 1) oder einer Säule durch einen *Fundamentsockel* (Abb. 2). Dadurch wird die Bauwerkslast auf eine größere Grundfläche verteilt; dies entspricht der gegenüber dem Mauerwerk oder dem Beton geringeren Festigkeit des Baugrundes. Bei besonders gering tragfähigem Baugrund wird das gesamte Bauwerk auf eine durchgehende *Grundplatte* gesetzt, wodurch sich die Bodenpressung erheblich verringert. Bei der hier beschriebenen Gründungsart, die in der Regel nahe der Erdoberfläche in frostfreier Tiefe oder gegebenenfalls unterhalb der Kellersohle von Gebäuden angewandt wird, spricht man von *Flachgründung*. Im Gegensatz dazu wird eine *Tiefgründung* gewählt, wenn die oberen Bodenschichten für die Aufnahme der Bauwerkslast nicht geeignet sind. In großem Umfange werden hier *Pfahlgründungen* angewandt (Abb. 3), mittels deren die Kräfte aus dem Bauwerk in tieferliegende Bodenschichten eingeleitet werden. Pfahlgründungen werden erstellt aus Rammpfählen (Holz, Stahlbeton, Stahl), die als Fertigpfähle auf der Baustelle angeliefert werden, oder aus Ortpfählen (Stahlbeton), die an Ort und Stelle im Boden hergestellt werden. Rammpfähle werden in den Boden gerammt, gerüttelt oder gegebenenfalls mittels Druckwasser in die Tiefe gespült. Zur Herstellung von Ortpfählen wird an der Pfahlstelle im Boden ein Hohlraum hergestellt, und zwar entweder im Bohrverfahren unter Ausheben des Bohrgutes oder mittels eines unten mit Spitze versehenen Rohres, das in den Boden gerammt, gepreßt oder gerüttelt wird. Der Hohlraum wird unter Einziehen einer Stahlbewehrung mit Beton gefüllt, der gleichzeitig verdichtet wird. Die einzelnen Pfähle unter einem Bauwerk werden mit einer Kopfplatte verbunden. So entsteht ein *Pfahlrost*, der dank seiner Verbundwirkung Ungleichmäßigkeiten im Lastanfall und im Untergrund ausgleichen kann.

Bei größeren Durchmessern von Tiefgründungselementen spricht man von *Brunnengründung* (Absenken einzelner aufeinandergesetzter Brunnenringe in den Baugrund bis auf festere Schichten, während jeweils der Boden innerhalb des Ringes entfernt wird). Der Zweck, größere Lasten zu übernehmen, wird auch durch Spezialgroßpfähle erreicht. Gründungspfähle übertragen überwiegend Kräfte parallel zu ihrer Längsachse.

Spundwandbauwerke (Abb. 6) sind tiefgegründete, selbständige Bauwerke, z. B. Ufereinfassungen, Kaiwände, Molen, Schleusenwände, Baugrubeneinfassungen. Sie werden erstellt durch Einrammen, gegebenenfalls auch durch Einrütteln oder Einspülen von Spundbohlen aus Holz, Stahlbeton oder Stahl. Derartige Konstruktionen haben vielfach überwiegend Seitenkräfte, z. B. Erddrücke, zu übernehmen. Außerdem dienen Spundwände der Abdichtung gegen Wasserströmung. *Stützmauern* sind Bauwerke des Grundbaus, durch die im wesentlichen Seitenkräfte aus Erddruck aufzunehmen sind. Wichtige Systeme sind z. B.: Schwergewichtsstützmauern, Winkelstützmauern ohne und mit Sporn (s. Abb. 5). *Baugruben* werden erforderlich, wenn in geringerer oder größerer Tiefe ein Grundbauwerk hergestellt werden soll. Durch eine Baugrubenaussteifung (Abb. 4) werden die Baugrubenwände gesichert, wenn sie senkrecht oder abgeböscht nicht frei anstehen, sondern die Gefahr des Einrutschens besteht.

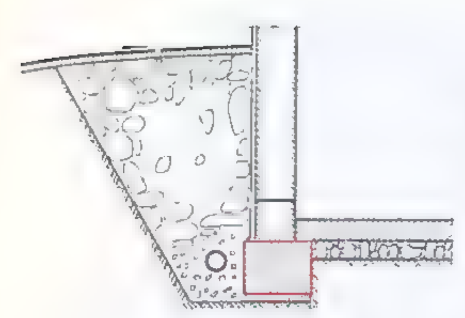


Abb. 1 Streifenfundament unter einer Kellerwand

Abb. 2 Fundamentsockel für eine Stütze

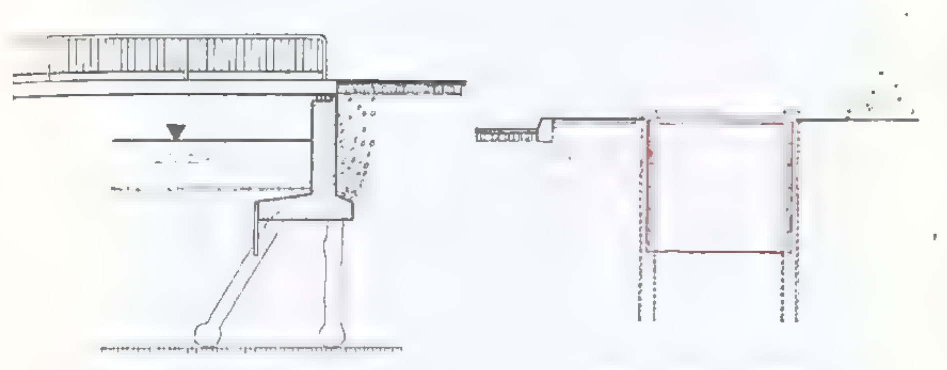


Abb. 3 Brückenwiderlager auf Bohrpfählen

Abb. 4 Einfache Baugrubenabsteifung

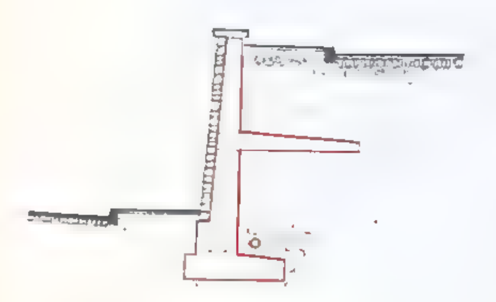


Abb. 5 Winkelstützmauer mit Holm



Abb. 6 Verankerung einer Spundwand

WÄRMESCHUTZ UND ISOLIERUNG

Zwei Körper verschiedener Temperatur gleichen ihre Temperatur aus bzw. nehmen die Temperatur ihrer Umgebung an; es entsteht eine Wärmeübertragung von Stellen höherer zu solchen niederer Temperatur. Man unterscheidet drei Arten der Wärmeübertragung: die Wärmekonvektion, die Wärmestrahlung und die Wärmeleitung. Bei der Wärmekonvektion (Abb. 1) erfolgt der Wärmetransport durch Gas- oder Flüssigkeitsströmungen, hervorgerufen durch örtliche Erwärmung und den Einfluß der Schwerkraft (z. B. Durchwärmung eines Zimmers durch die von Heizkörpern aufsteigenden Luftströmungen, Warmwasserheizung; (vgl. S. 270, S. 272ff.). Wärmestrahlung ist unabhängig von wärmeübertragender Materie und findet auch im luftleeren Raum statt. Jeder warme Körper sendet Strahlen (elektromagnetische Wellen) aus (Abb. 2; vgl. S. 52), die im infraroten Teil des Spektrums liegen, also große Wellenlängen haben. Körper, die viel Strahlung absorbieren (schlucken) können (z. B. Ruß), geben auch viel Strahlung wieder ab, während z. B. Luft strahlende Wärme hindurchgehen läßt, wobei sie sich durch die Strahlung nur geringfügig erwärmt (Sonnenstrahlen).

Bei der Wärmeleitung erfolgt ein Transport von Wärme im Innern fester Körper (Abb. 3) und innerhalb von Flüssigkeiten oder Gasen, wobei die Geschwindigkeit der Wärmeleitung von der Wärmeleitfähigkeit, der Wärmekapazität der Stoffe und der Temperaturdifferenz abhängt. In der Bautechnik ist die Wärmeleitzahl die Wärmemenge (kcal), die in 1 Stunde (h) durch einen Würfel von 1m³ senkrecht zu den Oberflächen während 1 Stunde Dauerheizung strömt, wenn die Temperaturdifferenz zwischen beiden gegenüberliegenden Oberflächen 1 Grad beträgt.

Wärmeleitzahlen einiger Baustoffe:

Stoff	Wert	Stoff	Wert
Stahl	~ 50	Putz	0,60 bis 0,75
Natursteine (Granit, Marmor)	2,5	Holz	~ 0,15
Stahlbeton	~ 1,5	Holzwolleplatten 5 cm	0,07
Ziegelmauerwerk	0,75	Korkplatten	~ 0,035
Fensterglas	~ 0,70	Schaumkunststoffe	0,035

Die Wärmekapazität (kcal/grd) eines Körpers ist die Wärmemenge, die man ihm zuführen oder entziehen muß, um seine Temperatur um 1 Grad (grd) zu ändern. Aus der Beziehung:

$$\frac{\text{Dicke eines Stoffes } d \text{ (m)}}{\text{seine Wärmeleitzahl (kcal/m h grd)}}$$

läßt sich der Wärmedurchlaßwiderstand (= Wärmedämmzahl) folgendermaßen definieren: Wärmedurchlaßwiderstand ist der Widerstand, den 1 m² eines ebenen Körpers der Dicke *d* (m) in 1 Stunde (h) dem Wärmestrom bei einer Temperaturdifferenz von 1 Grad (grd) beider Oberflächen entgegensetzt, d.h., je größer die Dicke und je kleiner die Wärmeleitzahl eines Stoffes, desto größer ist sein Wärmedurchlaßwiderstand (Abb. 4).

Der beste Wärmeisolator ist das Vakuum (in Verbindung mit einem wirksamen Wärmestrahlungsschutz). Eine wichtige Anwendung ist z. B. die Thermosflasche, die ein doppelwandiges, meist zwischen den Wandungen versilbertes Glasgefäß mit luftleerem Zwischenraum ist, bei dem der Strahlungsaustausch durch die Versilberung, die Wärmeleitung durch das Vakuum stark behindert ist. Im Bauwesen werden zur Isolation Baustoffe benutzt, die schlechte Wärmeleiter sind, d. h. Stoffe mit in vielen kleinen Poren eingeschlossener Luft. Bei zusammengesetzten Bauteilen wird die Wärmedämmzahl für jeden Stoff gesondert ermittelt und am Schluß zum Wärmedurchlaßwiderstand des ganzen Bauteils summiert. Die Berechnung und Ermittlung der Wärmedämmstoffe ist für Deutschland durch Normen festgelegt.

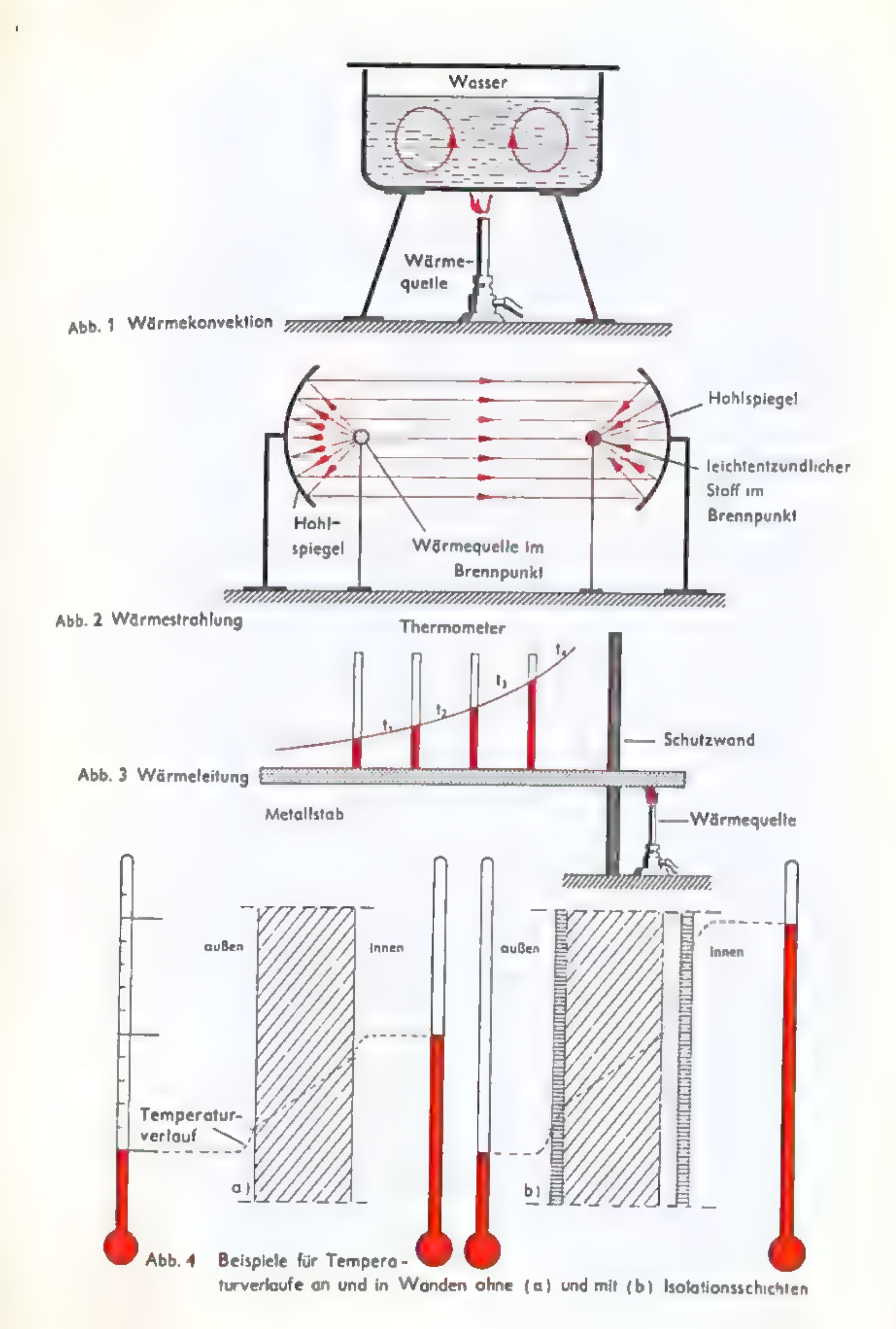


Abb. 1 Wärmekonvektion

Abb. 2 Wärmestrahlung

Abb. 3 Wärmeleitung

Abb. 4 Beispiele für Temperaturverlaufe an und in Wänden ohne (a) und mit (b) Isolationsschichten

HEIZEN, SCHORNSTEIN

Heizen bedeutet im engeren Sinn die Steigerung der Temperatur im unmittelbaren Lebensraum des Menschen. Dies kann geschehen durch Erhöhung der Temperatur der den Menschen umgebenden Luft (Konvektionsheizung) oder durch Anstrahlung mit Wärmestrahlen (Strahlungsheizung; vgl. S. 278). Bei der Konvektionsheizung (Abb. 1) wird durch einen Ofen oder einen Heizkörper (Abb. 2) die Temperatur der an der Wärmequelle vorbeigleitenden Luft erhöht, d. h., die Bewegungsenergie der Gasmoleküle der Luft wird gesteigert (in den Abb. 1 u. 2 sind die schnellen Moleküle rot, die langsamen schwarz gezeichnet). Die Anreicherung der Luft eines Zimmers mit schnellen Molekülen durch die Heizung erhöht die Raumtemperatur. Die Gesamtenergie im Raume bleibt jedoch unverändert. Eine Erhöhung der Wärmeenergie eines konstanten Gasvolumens würde eine Steigerung seines Druckes bedingen. Ein Wohnraum ist aber nie hermetisch abgeschlossen; durch Ritzen und Spalten an Fenstern und Türen, aber auch im Gebälk der Böden und Decken oder durch die Porosität des Mauerwerkes der Wände ist ein Druckausgleich mit der Umgebung vorhanden. Die Heizung steigert daher nicht den Betrag der Wärmeenergie in einem Raum, sondern nur deren Wertigkeit, d. h. ihre Temperatur. Der Quotient Wärmeenergie: Temperatur wird erniedrigt. Man nennt diesen Quotienten die reduzierte Wärmemenge und mißt mit seiner Hilfe die *Entropie*. Diese ist ein Maß für die Wertigkeit der Wärmeenergie. Die natürlichen Vorgänge streben stets in Richtung sinkender Temperatur, geringerer Wertigkeit der Wärmeenergie, größerer Werte der reduzierten Wärmemenge, wachsender Entropie.

Um die Entropie zu erniedrigen und damit die Temperatur zu steigern, bedarf es einer Wärmequelle (z. B. eines Ofens). Die Temperatur (genauer: die Entropie) nimmt – um einen Vergleich zu gebrauchen – in der Fabrik der natürlichen Vorgänge die Stelle des Direktors ein, da sie für deren Ablauf maßgebend ist. Die Energie hingegen liefert nur die Posten für den Buchhalter, der die Bilanz zum Ausgleich bringen muß. Bei jeder Konvektionsheizung erhöht man also trotz Energiezufuhr die Wärmeenergie im geheizten Raum nicht, man erniedrigt aber deren Entropie (steigert die Temperatur). Auch die andere Art der Heizung, die Strahlungsheizung, erniedrigt nur die Entropie, jedoch nicht die der umgebenden Luft, sondern nur die des angestrahlten Körpers.

Die älteste Strahlungsheizung ist der Kamin (Abb. 3). Glühende Kohlen oder Holzscheite sind die Quelle der Wärmestrahlung. Modernere Strahlungsheizkörper sind z. B. Heizsonnen oder Infrarotstrahler, bei denen elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird.

Bei allen Heizungen, bei denen die Wärmequelle ihre Energie aus einem Verbrennungsvorgang bezieht (Holz-, Kohle-, Ölheizung), spielt die Ableitung der Verbrennungsprodukte durch einen *Schornstein* neben der Funktion der Beseitigung der Abgase noch eine andere entscheidende Rolle. Da erwärmte Gase (also auch erwärmte Luft) leichter als Luft normaler Temperatur sind, erfahren sie in der Luft einen Auftrieb. Die Abgas-(Rauch-)Ableitung durch einen Schornstein erzeugt daher einen Luftzug im Feuerungs-(Verbrennungs-)Raum, der um so stärker ist, je höher der Schornstein ist, der die erwärmten Gase gebündelt zusammenhält (Abb. 4). Dieser Sog facht den Verbrennungsprozeß an. Am unteren Ende des Schornsteins befindet sich die sog. Rauchkammer, in der sich feste Partikel, die von den Abgasen mitgerissen werden und von unvollständiger Verbrennung des Heizmaterials herrühren (Ruß), ablagern können.

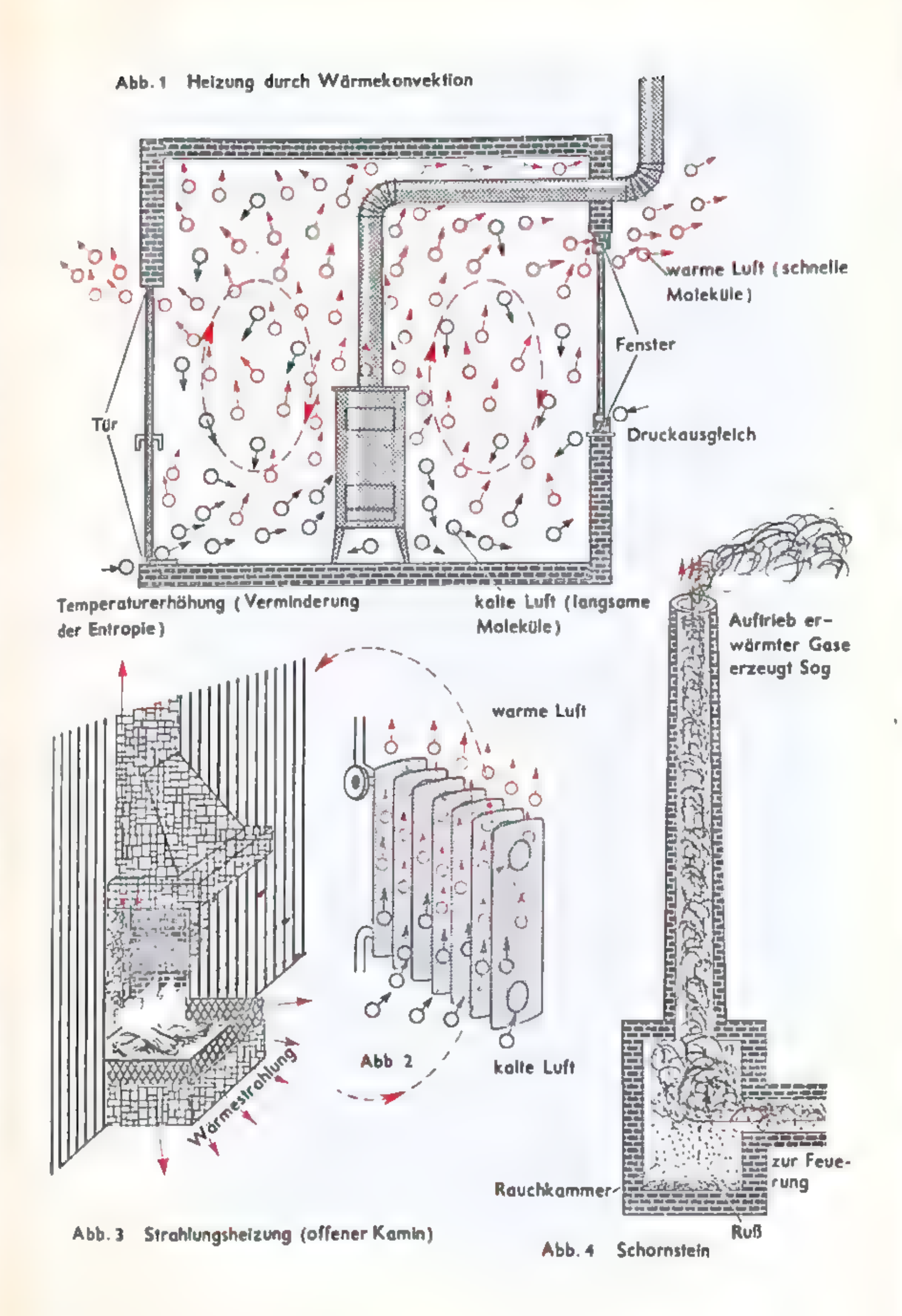


Abb. 1 Heizung durch Wärmekonvektion

Abb 2

Abb. 3 Strahlungsheizung (offener Kamin)

Abb. 4 Schornstein

WARMWASSERHEIZUNG (SCHWERKRAFTHEIZUNG)

Bei der Warmwasserheizung dient Wasser zum Transport der Wärme. Man macht sich dabei eine Naturerscheinung zunutze, wonach sich fast alle Körper (Festkörper, Flüssigkeiten und Gase) bei Erwärmung ausdehnen. Bringt man z. B. 1 cm³ Wasser von 4 °C auf eine höhere Temperatur, so nimmt es ein größeres Volumen ein, d. h. aber — da das Gesamtgewicht gleichbleibt —, 1 cm³ Wasser von höherer Temperatur ist leichter als 1 cm³ bei 4 °C. Man sagt, das wärmere Wasser hat ein kleineres spezifisches Gewicht als das kältere, es ist spezifisch leichter (unterhalb 4 °C liegen die Verhältnisse umgekehrt). Abb. 1 zeigt das Prinzip der Warmwasserheizung: Das am Boden des kugelförmigen Gefäßes erwärmte Wasser wird spezifisch leichter als seine Umgebung und steigt daher nach oben, während kühleres, also schwereres Wasser wieder zum Boden des Gefäßes strömt (Wirkung der Schwerkraft), dort erwärmt wird und ebenfalls zu steigen beginnt. In der Heizungsanlage nach Abb. 2 steigt das erwärmte Wasser aus dem Kessel durch Rohrleitungen bis in die Heizkörper. Dort kühlt es sich ab, weil es seine Wärme an den Raum abgibt. Es wird also wieder spezifisch schwerer und fällt als kaltes Wasser durch Rohrleitungen zurück in den Kessel, wo der Kreislauf erneut beginnt. Auf diese Weise stellt man durch Erwärmung und Abkühlung in der gesamten Heizungsanlage eine umlaufende Strömung her; der Kessel muß an der tiefsten Stelle der Anlage stehen.

Die Erwärmung des Wassers erfolgt im Mittel auf 90 °C. Man spricht dabei von der Vorlauftemperatur. Die Anzahl und Größe der Heizkörper soll so bemessen sein, daß die Temperatur des zurückfließenden Wassers, die Rücklauftemperatur, 70 °C beträgt.

Sehr wichtig für ein gutes Arbeiten ist die Entlüftung der Anlage. Die Luft, die sich bei leerer Anlage in den Heizkörpern befindet, wird beim Füllen zusammengepreßt und hängt als sog. Luftsack am oberen Ende des Heizkörpers, so daß das Warmwasser den Heizkörper nicht vollständig ausfüllen kann. Man verliert also Heizfläche. Deshalb entlüftet man an der höchsten Stelle der Steigleitung oder aber durch kleine Hähne direkt am Heizkörper.

Bei der einfachsten Bauform einer Warmwasserheizung führt man in einer Steigleitung das gesamte Heizwasser auf den Dachboden und läßt von hier aus die einzelnen Heizkörper hintereinander vom Warmwasser durchfließen (Abb. 2). Dadurch erhalten die oberen Räume warmes, die unteren Räume jedoch schon abgekühltes Wasser. Man muß daher die Heizkörper in den unteren Räumen größer ausführen als in den oberen.

Häufiger verwendet man eine Bauart, bei der zufließendes Heizwasser und abfließendes, abgekühltes Wasser in zwei verschiedenen Rohrleitungen geführt werden, das sog. Zweirohrsystem (Abb. 3). Hierbei kann das Wasser sowohl auf dem Dach als auch im Keller verteilt werden. In jedem Fall hängen die Heizkörper alle hintereinander an der Vorlaufleitung und entleeren sich in eine gemeinsame Rücklaufleitung, die das Wasser wieder dem Kessel zuführt.

Beim Anfahren werden die beschriebenen Anlagen vollständig mit kaltem Wasser gefüllt. An ihrer höchsten Stelle befindet sich ein Ausdehnungsgefäß, welches das durch die Erwärmung des Wassers entstehende größere Volumen aufnehmen kann.

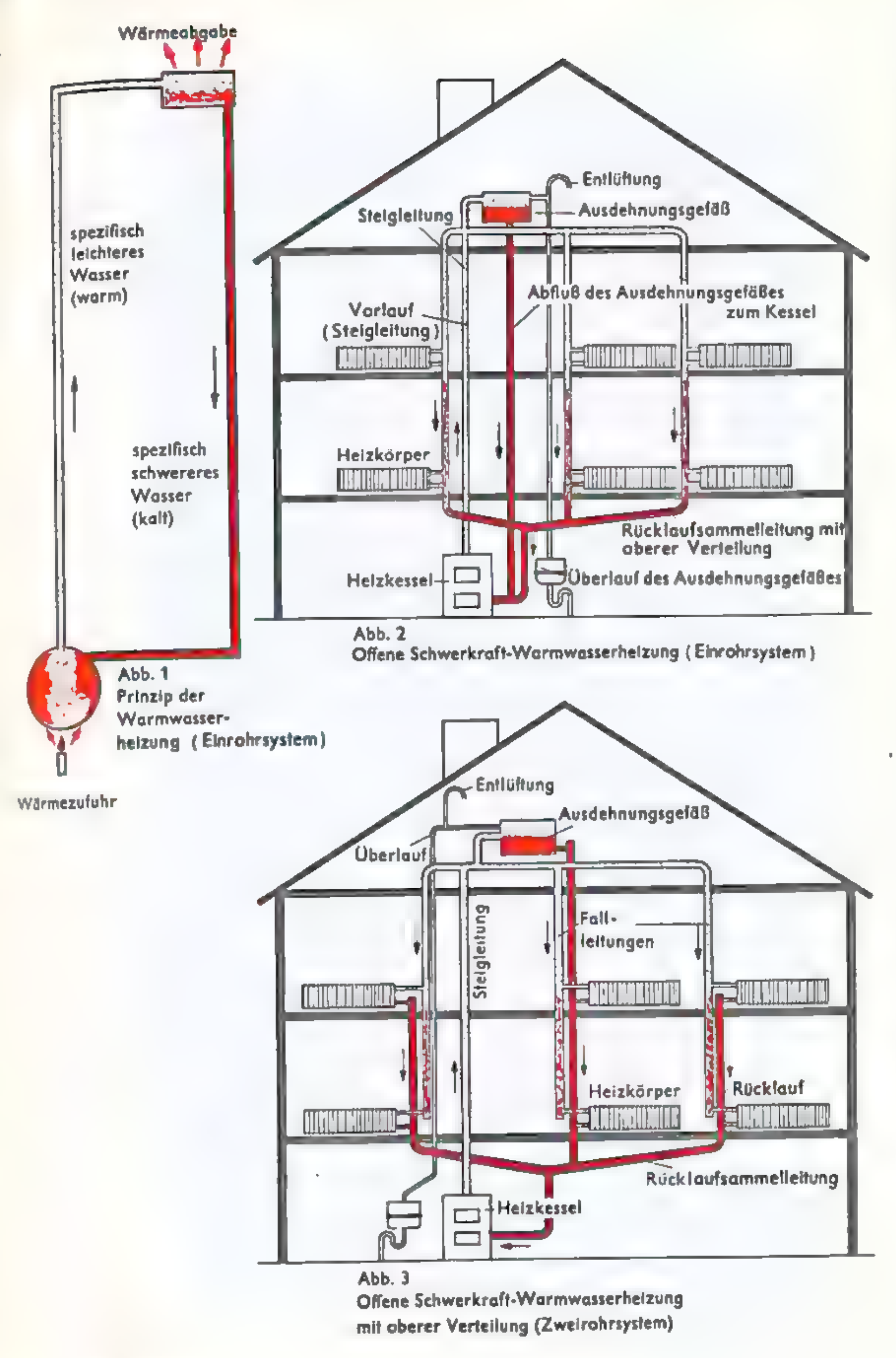


Abb. 1 Prinzip der Warmwasserheizung (Einrohrsystem)

Abb. 2 Offene Schwerkraft-Warmwasserheizung (Einrohrsystem)

Abb. 3 Offene Schwerkraft-Warmwasserheizung mit oberer Verteilung (Zweirohrsystem)

WARMWASSERHEIZUNG MIT ZWANGSUMLAUF (PUMPENWARMWASSERHEIZUNG)

Im Gegensatz zur Warmwasserheizung ohne Zwangsumlauf, bei der die Strömung in der Anlage nur durch die verschiedenen spezifischen Gewichte des unterschiedlich temperierten Wassers hervorgerufen wird, erzeugt man in Anlagen dieser Bauart den Wasserumlauf durch Pumpen. Die Zwangsumlaufheizung wird prinzipiell bei höheren Gebäuden eingebaut, weil hier bei Verwendung einer Warmwasserheizung ohne Zwangsumlauf die Querschnitte der Rohrleitungen zu groß sein müßten; doch finden sich Pumpenwarmwasserheizungen auch in einstöckigen Häusern in steigendem Maße.

Als Pumpen verwendet man ausschließlich spezielle Kreiselpumpen (vgl. S. 244); sie setzen bei ihrem Ausfall der Strömung in der Leitung einen so geringen Widerstand entgegen, daß die Heizung dann auch ohne Zwangsumlauf, also als Schwerkraftheizung, arbeiten kann.

Die Pumpe kann sowohl in den Vorlauf als auch in den Rücklauf eingebaut werden. Im ersten Fall steht die Pumpe in der Leitung vom Kessel zu den Heizkörpern, d. h. in der Vorlaufleitung, saugt das Warmwasser aus dem Kessel, drückt es durch die Leitungen in die Heizkörper und durch die Rücklaufleitung zurück in den Kessel. Wenn die Pumpe in den Rücklauf eingebaut ist, saugt sie abgekühltes Wasser aus den Heizkörpern und drückt es zurück in den Kessel. Die einfachste Schaltung der Warmwasserheizung mit Zwangsumlauf ist die Hintereinanderkoppelung aller Heizkörper, das Einrohrsystem (Abb. 1). Man kann hierbei mehrere Kreise in der Art anordnen, daß immer eine Gruppe von Räumen an eine Leitung angeschlossen ist. In Häusern, wo ein Abstellen nicht oder nur selten in Frage kommt, verwendet man diese Bauart. Wesentlich verbessert wird die Einrohranlage durch Verlegung der Heizkörper in Abzweigungen der Hauptleitung. Die Abzweigleitung kann dann mit einem Regulierventil versehen werden, ohne daß man die Wasserzufuhr für die unteren Heizkörper drosseln müßte. Hinter den Heizkörpern läuft das abgekühlte Wasser zurück in die Hauptrückleitung.

Das Zweirohrsystem ist prinzipiell genauso ausgeführt wie das entsprechende System der Warmwasserheizung ohne Zwangsumlauf, also mit oberer und unterer Verteilung. Hinzu kommt die unterschiedliche Pumpenaufstellung (entweder im Vor- oder Rücklauf; Abb. 2 u. 3). Das Zweirohrsystem entsteht dadurch, daß das warme Wasser, das in den Heizkörper zuläuft, und das abgekühlte Wasser, das daraus abläuft, in zwei verschiedenen Rohrleitungen geführt werden. Die beschriebenen Anlagen werden als sog. offene Heizungen ausgeführt, d. h., sie stehen mit der Außenluft durch eine Entlüftung des Ausdehnungsgefäßes in Verbindung und sind dadurch in ihrem oberen Teil drucklos. Alle Warmwasserheizungen können automatisch gesteuert werden, d. h., die gewünschte Raumtemperatur wird konstant auf einem einstellbaren Wert gehalten.

Dazu sind in den beheizten Räumen Thermostate (s. S. 360) eingebaut. Auf diesen Thermostaten stellt man die gewünschte Raumtemperatur ein. Sie geben dann bei Absinken oder Ansteigen der Temperatur Impulse an die entsprechenden Regelorgane der Anlage, mehr oder weniger Wärme heranzuführen. Die dafür in Frage kommenden Regelorgane sind entweder die Regulierventile der einzelnen Heizkörper (man kann dann in jedem Raum eine andere Temperatur einstellen) oder aber die Kesselanlage selbst, wo man bei Ölfeuerung den Brenner oder die Ölmenge steuert, bei Kohlenfeuerungen die Menge der Verbrennungsluft dosiert. Bei geringer Luftzufuhr wird die Verbrennung langsamer ablaufen, während bei starker Luftzufuhr die Verbrennung schnell und unter großer Wärmeentwicklung vor sich geht. Bei Warmwasserheizungen mit Zwangsumlauf kann auch die Fördermenge der Wasserpumpen eingestellt und damit die herantransportierte Wärmemenge reguliert werden.

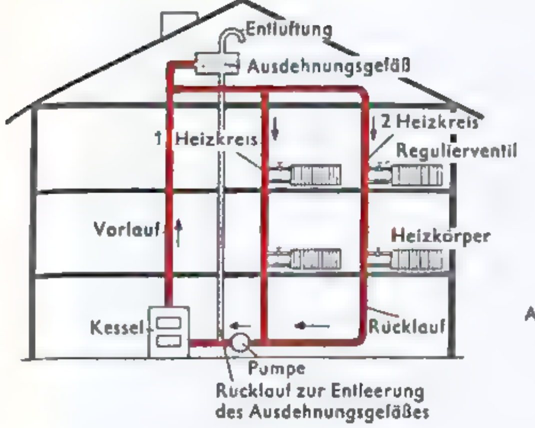


Abb. 1 Einrohrsystem der offenen Warmwasserheizung. Alle Heizkörper an einem Strang hintereinandergeschaltet (2 Heizkreise); Pumpe im Rücklauf

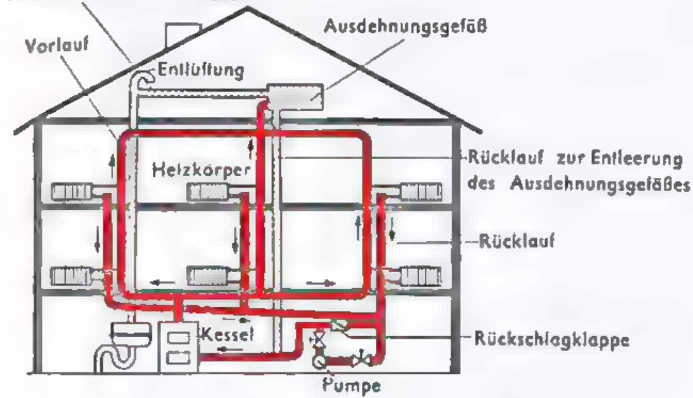


Abb. 2 Warmwasserheizung als Zweirohrsystem mit unterer Verteilung; Pumpe im Rücklauf

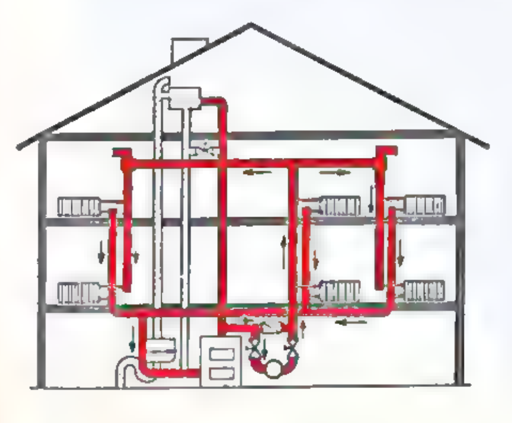


Abb. 3 Warmwasserheizung als Zweirohrsystem mit oberer Verteilung; Pumpe im Vorlauf

DAMPFHEIZUNG

Bei diesem Typ der Zentralheizung transportiert der Wasserdampf die Wärme zu den Heizkörpern. Infolge der Wärmeabgabe verflüssigt sich dort der Dampf; er wird zum Kondensat, das in den Heizkessel zurückfließt und dort wieder verdampft wird (Abb. 1). Gewöhnlich verwendet man in Wohnhäusern offene Niederdruckdampfheizungen, die durch Ventile mit der Atmosphäre verbunden sind und mit einem Überdruck von weniger als 0,5 at arbeiten. Gegenüber der Warmwasserheizung sind die Temperaturen in den Heizkörpern der Dampfheizung wesentlich höher, denn der Heizdampf hat eine Temperatur von rd. 105°C.
Vom Kessel steigt der Dampf zur Hauptverteilungsleitung, die sich entweder an der Kellerdecke (untere Verteilung; Abb. 2a) oder auf dem Dachboden (obere Verteilung; Abb. 2b) befindet. Von hier aus strömt der Dampf in die Heizkörper; das Kondensat fließt in der gleichen Leitung zurück zum Kessel. Diese Kondensatrückflußleitung kann an der Kellerdecke liegen, d.h. höher als der Wasserstand im Kessel. Man spricht dann von „trockener" Kondensatrückführung. Um zu vermeiden, daß unverbrauchter Dampf aus dem Heizungssystem in den Kessel zurückströmt, muß man bei trockener Kondensatrückführung in der Leitung Wasserschleifen anbringen. Im unteren Teil dieser Schleife steht immer Wasser. Der Dampf kann diese Wasserbarriere nicht wegschieben und muß so lange im Heizungssystem bleiben, bis er die in ihm enthaltene Verdampfungswärme größtenteils abgegeben hat, d. h. bis er kondensiert ist. Dieses neu hinzukommende Wasser schiebt dann das in der Schleife stehende Wasser in den Kessel weiter. Nur der letzte Rest bleibt wieder in der Schleife zurück. Die zweite Art der Kondensatrückführung ist die „nasse" Rückführung. Hier verläuft die Leitung unterhalb des Wasserspiegels im Kessel, so daß die gesamte Leitung bis zu dieser Höhe unter Wasser steht und so den Dampfabschluß bildet.
Beim gebräuchlicheren Zweirohrsystem strömen Dampf und Kondensat in verschiedenen Leitungen. Auch hier ist entweder eine untere (Abb. 3a) oder auch eine obere Verteilung (Abb. 3b) möglich. In beiden Fällen tritt der Dampf jedoch immer oben in den Heizkörper ein und das Kondensat unten aus. Bei trockener Kondensatrückführung sind wieder die Wasserschleifen erforderlich, bei nasser Rückführung nicht.
Wenn das System mit Dampf gefüllt wird, wird die darin befindliche Luft beim Anfahren vom Dampf abwärts in die Kondensatleitung gedrückt, da der Dampf spezifisch leichter als die Luft ist und praktisch auf der Luft „schwimmt". Deshalb müssen die Kondensatleitungen an der tiefsten Stelle der Dampfleitung entlüftet werden. Bei der trockenen Rückführung wird die Kondensatleitung direkt entlüftet. Bei der nassen Rückführung werden gesonderte Entlüftungsleitungen eingebaut. Daneben gibt es auch Entlüftungseinrichtungen an den einzelnen Heizkörpern.
Um den Überdruck im Kessel nicht über das zulässige Maß ansteigen zu lassen, müssen Standrohre angebracht werden (Abb. 4). Von der Dampfleitung zweigt ein Rohr mit einer Wasserschleife ab. Wird der Druck im Kessel größer, so wird das Wasser im Rohr I abwärts gedrückt, während es in den Rohren II und III ansteigt. Der Höhenunterschied beider Wasserspiegel ist ein Maß für den Dampfdruck. Steigt der Druck über den zulässigen Wert an, so wird der Wasserspiegel im Rohr I so weit abwärts gedrückt, bis der Dampf durch das Rohr II und den Behälter sowie das Rohr IV ins Freie strömen kann. Das aus dem Rohr II verdrängte Wasser tritt in den Behälter und kann bei fallendem Dampfdruck wieder durch das Rohr III in die Wasserschleife gelangen. Auf diese Weise werden Wasserverluste vermieden. Bei noch höherem Dampfdruck kann der Dampf schließlich sogar über die Rohre III und IV ins Freie gelangen. So wird mit Sicherheit eine Kesselexplosion vermieden.

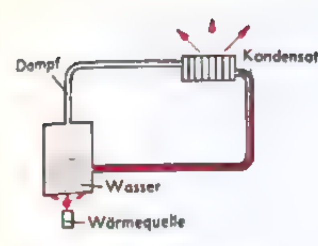


Abb. 1 Kreislaufschema einer Dampfheizung

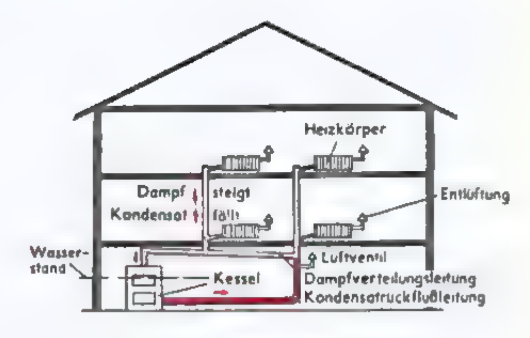


Abb 2a Einrohr-Niederdruckdampfheizung mit unterer Verteilung und nasser Kondensatrückführung

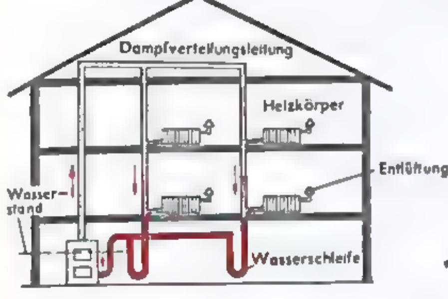


Abb. 2b Einrohr-Niederdruckdampfheizung mit oberer Verteilung und trockener Kondensatrückführung

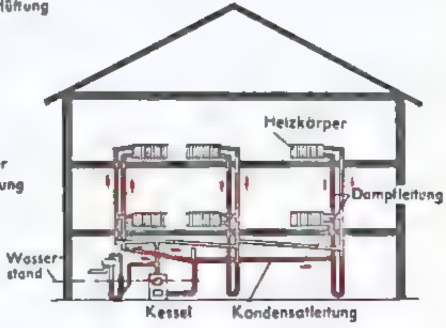


Abb. 3a Zweirohr-Niederdruckdampfheizung mit unterer Verteilung und trockener Kondensatleitung

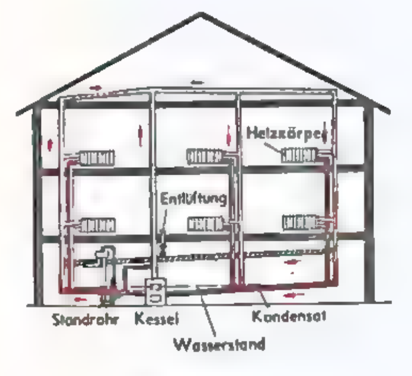


Abb. 3b Zweirohr-Niederdruckdampfheizung mit oberer Verteilung und nasser Kondensatleitung

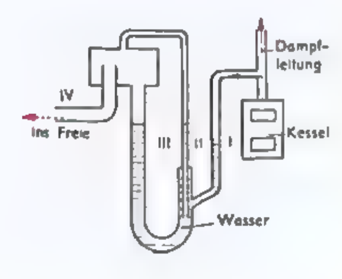


Abb. 4 Standrohr

GASHEIZUNG

Gasheizungen werden meist mit normalem Stadtgas betrieben. Sie finden dann Verwendung, wenn keine allzu große Heizleistung benötigt wird, also z. B. in Übergangszeiten oder in Gegenden, in denen ein überwiegend mildes Klima herrscht.

Wie bei jeder anderen Heizung beruht auch die Wirkungsweise der Gasheizung auf drei physikalischen Vorgängen: der Wärmestrahlung, der Wärmekonvektion und der Wärmeleitung. Je nach Bauart der Heizungsanlage tritt einer dieser Effekte mehr oder weniger stark hervor.

Ein Typ der Gasheizungen ist unter der Bezeichnung Infrarot- oder Ultrarotstrahler bekannt geworden. Man nennt sie so, weil die wärmenden Strahlen, die gleicher Natur sind wie das sichtbare Licht, sich in ihrer Wellenlänge an die Wellenlänge des Rotlichts anschließen. Jede Wärmestrahlung ist eine Infra- oder Ultrarotstrahlung (vgl. S. 52), also auch diejenige, die von der beheizten Wand eines Kachelofens ausgeht (allerdings beruht dort die Heizwirkung vorwiegend auf Konvektion; s. S. 268). Erzeugt werden diese Strahlen, indem man in Brennern das Gas verbrennt (Abb. 1 a) und mit der freiwerdenden Wärme unmittelbar an den Brennern angeordnete Platten aus Schamotte, Stahlgewebe oder anderen geeigneten Materialien zum Glühen bringt. Diese glühenden Platten kann man zur Heizung von kleinen Räumen in sog. Gasstrahlungsöfen oder zur Heizung von Hallen und großen Räumen an der Decke unterbringen (Abb. 1b). Die Strahlung wird um so stärker, je höher die Temperatur der beheizten Platten ist.

Eine andere Art der Gasheizungen stellen die sog. Konvektionsöfen dar. Hier gibt das abströmende heiße Verbrennungsgas seine Wärme vorwiegend indirekt an die umgebende Luft ab. Die bekannteste Art dieser Öfen sind die Gasradiatoren, bei denen an der Unterseite die Brenner in einer Reihe angeordnet sind, das heiße Abgas durch die Rippen strömt und dadurch die Luft an der Außenseite erwärmt. Die modernste Bauart eines Konvektionsofens ist der sogenannte schornsteinlose Ofen (Abb. 3). Er kann an jeder Außenwand aufgestellt werden. Die abgekühlten Heizgase strömen dabei durch ein Abzugsrohr unmittelbar ins Freie. Es kommt bei diesen Konvektionsöfen darauf an, die Heizgase auf möglichst langen Wegen im Ofen herumzuführen, damit sie ihre Wärme weitgehend abgeben können.

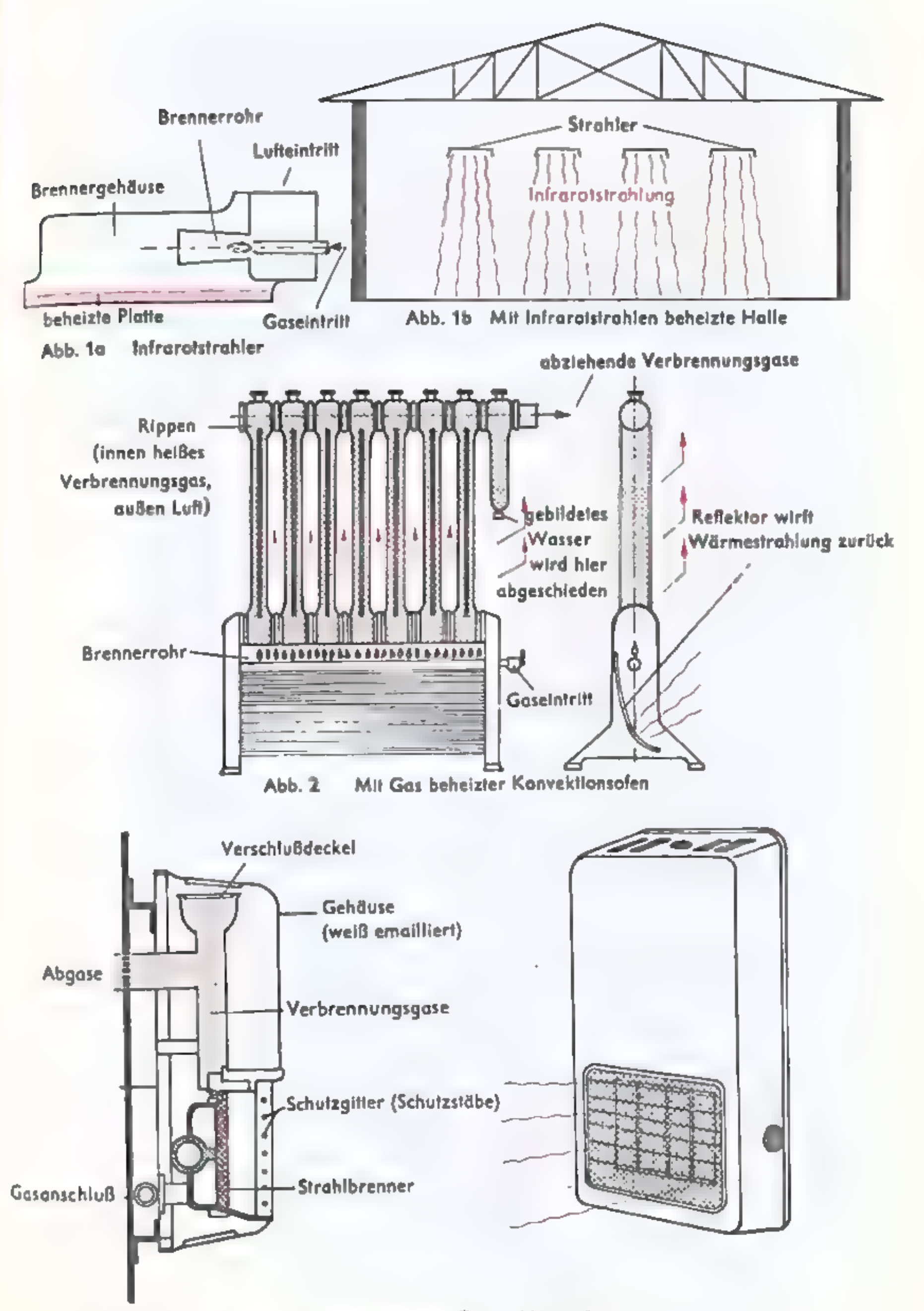


Abb. 1a Infrarotstrahler

Abb. 1b Mit Infrarotstrahlen beheizte Halle

Abb. 2 Mit Gas beheizter Konvektionsofen

Abb. 3 Schornsteinloser Gasstrahlungsofen

WASSERVERSORGUNG

In der Natur führt das Wasser einen geschlossenen Kreislauf durch (Abb. 1). Die Luft kann bei Erwärmung Wasser in Form von Dampf aufnehmen, gibt aber bei Abkühlung Wasser als Niederschlag wieder ab. Wasser verdunstet — verdampft unterhalb seiner Siedetemperatur — an der Oberfläche des Bodens, an der Gewässeroberfläche und an der Blattoberfläche von Pflanzen. Da warme Luft leichter als kalte Luft ist, steigt erwärmte Luft unter Mitnahme des Wasserdampfes auf. Dabei bewirken Winde die waagerechte Bewegung des Wasserdampfes. Kühlt diese Luft z. B. beim Aufsteigen über Gebirgszüge oder infolge Vermischen mit kälteren Luftströmen ab, so verflüssigt sich ein Teil des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes, und es entstehen Wolken. Weitere Abkühlung der Luft führt zum Niederschlag, der z. B. als Regen oder Schnee zur Erde niederfällt. Ein Teil des Niederschlages versickert im Boden. Auf wasserundurchlässige Schichten im Untergrund stoßend, sammelt sich der Niederschlag zum Grundwasser. Ein anderer Teil des Niederschlages verdunstet oder fließt oberirdisch in Wasserläufe und gelangt in das Meer.
Die Sammlung von Regenwasser in Zisternen geschieht nur noch selten. In steigendem Maße geht man für die Wasserversorgung auf Oberflächenwasser über. Das Wasser wird z. B. kleineren nicht verschmutzten Wasserläufen entnommen, deren jahreszeitlich schwankender Wasseranfall durch Aufstauen und Anlegen von Seen ausgeglichen wird. Hierzu werden in Flußtälern Staumauern (s. Talsperren) errichtet. Wenn das Wasser nicht so sehr verunreinigt ist, kann es auch aus natürlichen Seen entnommen werden. Flußwasser ist wegen der starken Verschmutzung nur noch z. B. als Kühlwasser für industrielle Zwecke geeignet. Wo immer möglich, wird zur Wasserversorgung Grundwasser verwendet, das infolge der Reinigungswirkung des Untergrundes hygienisch einwandfrei ist. Das Grundwasser kann durch gefaßte Quellen oder andere Entnahmevorrichtungen, z. B. Brunnen, gewonnen werden. Ein- und mehrstufige Kreiselpumpen heben und fördern das Wasser. Genügt das gefaßte Rohwasser nicht den Anforderungen für Trinkwasser, dann werden die störenden Stoffe in einer Wasseraufbereitungsanlage entzogen.
Zum Speichern des aufbereiteten Wassers und zum Ausgleich des schwankenden Bedarfes dienen z. B. Hochbehälter, die u. a. einen konstanten Wasserdruck gewährleisten. Die Höhenlage des Hochbehälters zu den zu versorgenden Gebäuden wird durch den an der Zapfstelle erforderlichen Druck bestimmt (Abb. 2 a). Der Wasserspiegel im Hochbehälter liegt etwa 40—50 m über den Zapfstellen. Der Hochbehälter, die unterirdische Wasserleitung und die im Haus senkrecht verlaufende Steigleitung bilden eine kommunizierende Röhre (Abb. 2 b), deren einer Schenkel, die Steigleitung, verkürzt und mit Ventilen abgeschlossen ist. Der an den Ventilen (Zapfstellen) herrschende Druck ergibt sich unter Vernachlässigung des Druckverlustes in der Rohrleitung aus dem Höhenunterschied zwischen Wasserspiegel im Hochbehälter und Zapfstelle. Bei Vorhandensein einer ausreichend hohen Geländeerhebung kann der Hochbehälter als Erdbehälter ausgeführt werden, andernfalls muß man den Behälter auf einem entsprechend hohen Unterbau errichten. Dieser Wasserturm (Abb. 3) ist meistens aus Stahlbeton hergestellt. Liegt der Hochbehälter zwischen Wasserwerk und Verbraucher, so wird er von der gesamten Wassermenge durchflossen (Durchgangsbehälter). Der Hochbehälter kann aber auch im Mittelpunkt des gesamten Versorgungsgebietes als Schwerpunktbehälter angeordnet sein. Ferner ist es möglich, daß das Versorgungsgebiet zwischen dem Wasserwerk und dem Gegenbehälter liegt. Die Wasserführung zu den einzelnen Häusern des Versorgungsgebietes erfolgt in Rohrleitungen, z. B. aus Grauguß oder Stahl, die in den Straßen frostsicher etwa 1,5 m unter der Straßenoberfläche verlegt sind. Die den Verbrauchern zugeführte Wassermenge wird mit Wasserzählern ermittelt.

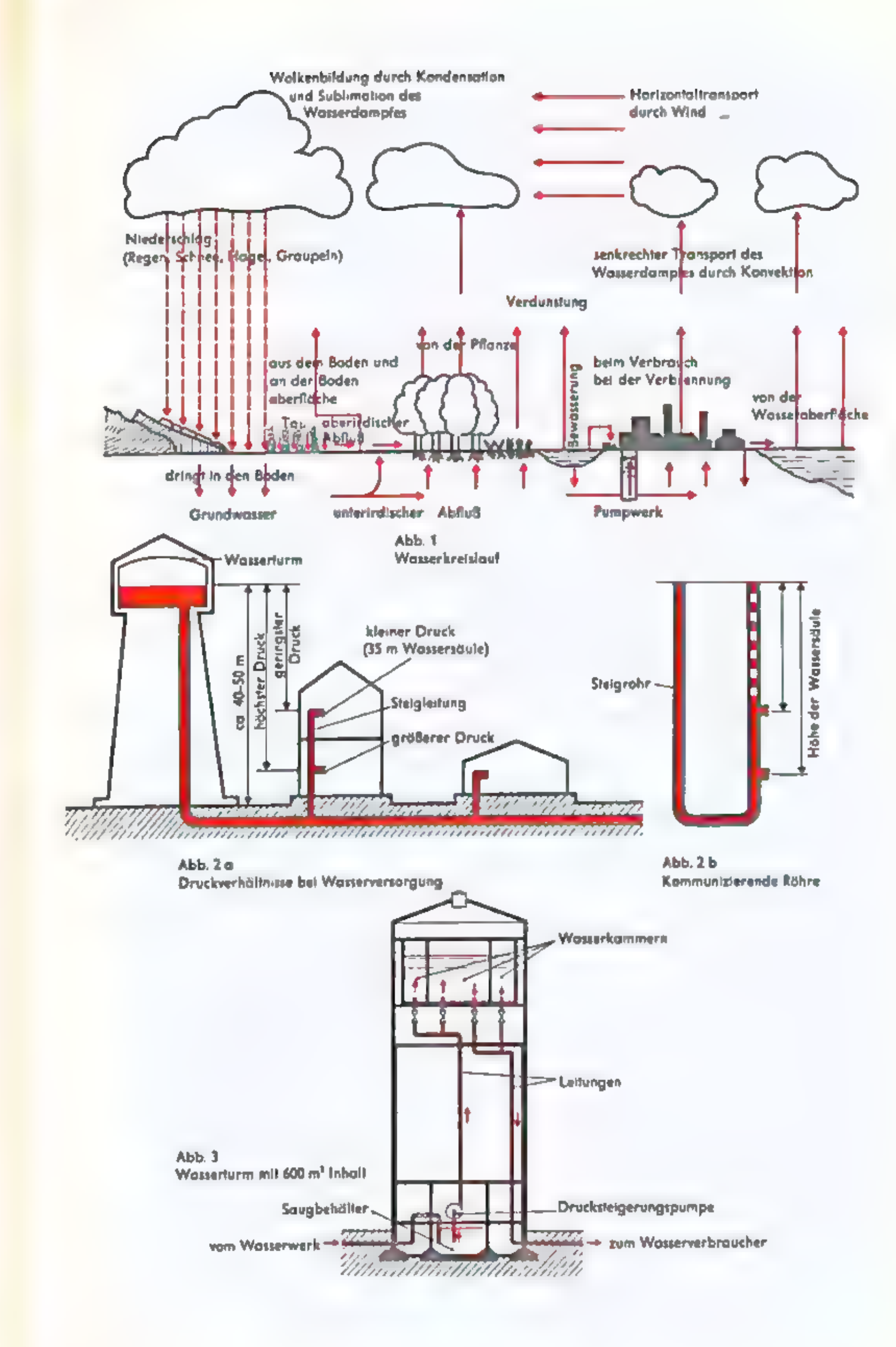


Abb. 1
Wasserkreislauf

Abb. 2 a
Druckverhältnisse bei Wasserversorgung

Abb. 2 b
Kommunizierende Röhre

Abb. 3
Wasserturm mit 600 m³ Inhalt

STADTENTWÄSSERUNG

Die Kanalisation beginnt mit der in den Gebäuden vorgesehenen Entwässerungsanlage (Abb. 1). Die Ablaufstellen des Abwassers sind über geneigt verlaufende Anschlußleitungen mit den senkrecht verlegten, die gesamte Gebäudehöhe durchdringenden Falleitungen verbunden. Letztere münden in die Hauptgrundleitung. Durch das in der Falleitung ablaufende Wasser würde infolge des rasch absinkenden Wasserspiegels ein Unterdruck entstehen, der über die Geruchverschlüsse gurgelnd Luft ansaugt. Um dies zu verhindern ist jede Falleitung zur Entlüftung bis über das Dach des Gebäudes geführt. Alle Ablaufstellen eines Gebäudes wie Spül-, Wasch- und Duschbecken, Badewannen, Spülklosetts etc. sind mit einem Geruchsverschluß versehen. Dieser Verschluß besteht aus einem U-förmig gebogenen Leitungsteil, das bis zum Überlauf in die Anschlußleitung immer mit Wasser gefüllt ist. Die Wasserfüllung wirkt als abwasserdurchlässiger Gasverschluß und verhindert, daß Faulgase aus der Kanalisation in die Räume des Gebäudes eindringen können. Bei der Mischkanalisation, die Abwasser und Regenwasser gemeinsam abführt, wird das vom Dach gesammelte Regenwasser über Regenrinne, Regenfalleitung in die Hauptgrundleitung geführt. Ein in der Regenfalleitung angeordneter Regenrohrschmutzfänger hält die Ablaufleitung verstopfende Verunreinigungen, z. B. Laub, in einem siebartigen Einsatz des Sinkkastens zurück (Abb. 3). Die Hauptgrundleitung mündet in den ausreichend tief unter der Straßenoberfläche liegenden Straßenkanal, so daß kein Rückstau in die Kellerentwässerung der angeschlossenen Gebäude möglich ist. Die Kellersinkkästen sind z. B. mit einer Klappe als selbsttätigem Rückstauverschluß und zusätzlich mit einem Absperrventil (Abb. 4) ausgerüstet.
Die unterirdischen Straßenkanäle folgen dem Straßenverlauf der Ansiedlung. Sie münden in die Nebensammler, die das Abwasser auf kürzestem Wege zum Hauptsammler führen. Topographische Gestalt, Bebauung der Oberfläche sowie die Lage der Ansiedlung zu einem das Abwasser aufnehmenden Gewässer (Vorfluter) bestimmen die Anordnung des Kanalisationssystemes (Abb. 6).
Das Abwasser führt absinkende Verunreinigungen wie Sand oder feste Abfälle mit sich. Die Geschwindigkeit muß in den Kanalrohren so hoch sein, daß die Verunreinigungen ohne abzulagern abgeschwemmt werden. Bei dieser Schwemmkanalisation beträgt die Abflußgeschwindigkeit für Trockenwetterabfluß (Schmutzwasserabfluß ohne Regenwasserabfluß) und Mindestwasserhöhe von ca. 3 cm mindestens 0,6 m/s. Bei Regenwetter und Vollfüllung sind 5—6 m/s zulässig. Die Geschwindigkeit ist von dem Gefälle der Abwasserleitung abhängig. Das Gefälle der Leitung wird weitgehend dem der Straße angepaßt und liegt zwischen 1 m auf 1000 m bis 1 m auf ca. 100 m (1:1000 bis 1:100).
Die Kanalleitungen haben unterschiedliche Querschnittsformen (Abb. 7). Diese sind bei der Mischkanalisation dem stark schwankenden Wasseranfall unter Berücksichtigung der günstigsten Strömungsgeschwindigkeit angepaßt (Abb. 8). Die Kanalrohre liegen ca. 1 bis 3,5 m tief unter der Straßenoberfläche meist in Straßenmitte. In regelmäßigen Abständen sind zur Reinigung, Begehung und Belüftung Einsteigschächte vorgesehen. Bei der Trennkanalisation wird Abwasser und Regenwasser getrennt abgeführt. Hierzu sind Regen- und Schmutzwasserleitung meist nebeneinander verlegt.

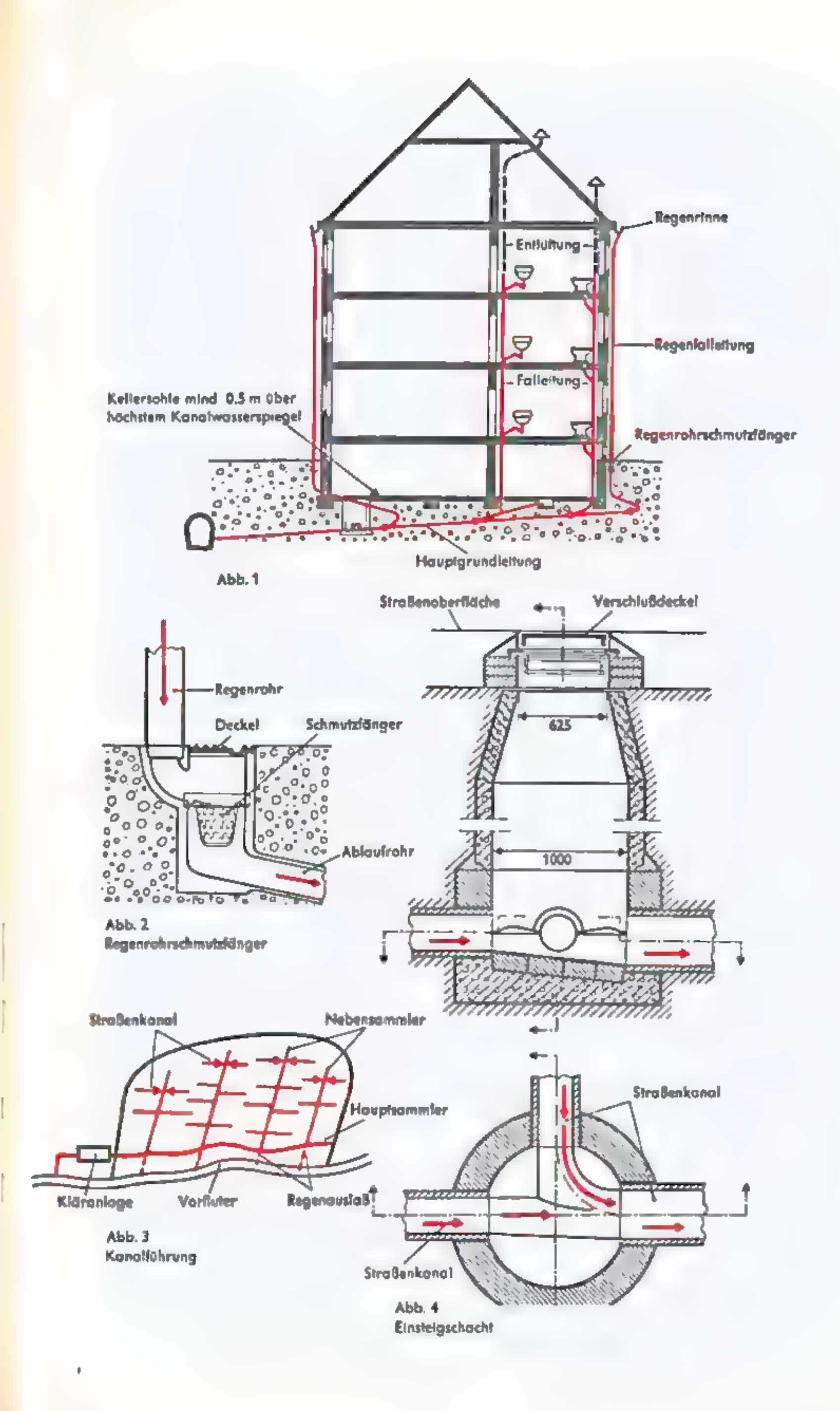


Abb. 1

Abb. 2
Regenrohrschmutzfänger

Abb. 3
Kanalführung

Abb. 4
Einsteigschacht

ABWASSERREINIGUNG

In der Mischkanalisation an verschiedenen Stellen angeordnete Regenauslässe und Rückhaltebecken lassen eine wirtschaftliche Auslegung der Anlage zur Abwasserreinigung (Kläranlage) zu. Der Regenauslaß besteht im wesentlichen aus einem Streichwehr, bei dem die den Trockenwetterabfluß wesentlich übersteigende Wassermenge in einem zweiten nachgeschalteten Kanal überstürzt. Durch diesen fließt das Abwasser direkt in den Vorfluter. Dabei gelangen allerdings auch Schmutzstoffe in den Vorfluter. Das läßt sich mit Rückhaltebecken verhindern. Das sind entweder natürliche Teiche oder künstliche Becken. Sie stauen vorübergehend die durch Regenfall angestiegene Abwassermenge auf, um diese dann allmählich an die Kläranlage abzugeben.

In der Kläranlage (Abb. 1) gelangen die Abwässer zunächst zur mechanischen Rechenanlage, wo grobe Schwebe- und Schwimmstoffe von den gitterartig angeordneten Stäben des Rechens festgehalten werden. Die Rechen werden maschinell gereinigt. Das Rechengut wird z. B. zerkleinert und wieder hinter dem Rechen dem Abwasser zugeleitet. Der nachfolgende Sandfang besteht aus länglichen nebeneinander angeordneten Gerinnen oder aus einem runden Absetzbecken. In diesen wird die Fließgeschwindigkeit des Abwassers so stark herabgesetzt, daß die Schleppkraft des Wassers nicht mehr ausreicht, Quarzsand mitzuführen. Dieser sinkt auf den Beckenboden ab und wird dort abgesaugt. Das Abwasser fließt nun in ein Absetzbecken (Abb. 2), wo sich organische und mineralische Stoffe (körnige und zu Flocken sich anlagernde Schmutzteilchen mit unterschiedlicher Sinkgeschwindigkeit) absetzen. Die mittlere Durchflußzeit des Abwassers durch das Absetzbecken beträgt ca. 1,5 h. Für die Klärung großer Abwassermengen werden runde oder rechteckige Absetzbecken verwendet. Bei den waagerecht durchflossenen Becken muß der gesamte Beckenquerschnitt gleichmäßig durchströmt werden. Hierzu sind an den Beckeneinläufen Vorrichtungen angebracht, die das Abwasser gleichmäßig auf dem Beckenquerschnitt verteilen. Das Wasser durchströmt das Becken mit so geringer Geschwindigkeit, daß die Feststoffteilchen auf den Beckenboden absinken. Das so geklärte Abwasser fällt am Beckenende über eine höhenverstellbare Überlaufkante in eine Sammelrinne. Der abgesetzte Schlamm wird von einem Räumer erfaßt und ganz langsam, so daß der Schlamm nicht wieder aufwirbelt, zum Schlammsumpf geschoben und dort abgesaugt. Die Längsräumer sind hierzu an einer auf dem Beckenrand verfahrbaren Brücke befestigt.

Das mechanisch geklärte kommunale Abwasser wird mit biologischen Verfahren von noch vorhandenen organischen Verunreinigungen befreit. Bei den natürlichen biologischen Verfahren gelangt das Abwasser ohne weitere Behandlung in den natürlichen Wasserkreislauf zurück. Hierzu wird das Abwasser auf landwirtschaftlich genutzte Felder verteilt oder in einen Abwasserteich geleitet. Am häufigsten werden jedoch die technisch-biologischen Verfahren angewendet.

Bei dem Belebungsverfahren wird der für den biologischen Abbau erforderliche Luftsauerstoff in einem Belebungsbecken über Belüftungseinrichtungen in das Abwasser eingebracht. Hierzu kann z. B. Druckluft über gelochte Rohre eingeblasen oder Luftsauerstoff durch an der Oberfläche rotierende Bürsten oder Plattenwalzen eingerührt werden (Abb. 3). Letztere sind an der Beckenlängswand angeordnet und werden angetrieben. Die Belüftungszeit beträgt etwa 1,5 Stunden. Die abbauenden Mikroorganismen sind im Belebungsbecken flockenartige Ansammlungen (Belebtschlamm). In einem nachgeschalteten Absetzbecken wird der Belebtschlamm abgetrennt. Ein Teil des Schlammes gelangt zur Beschleunigung des Abbaues in das Belebtbecken zurück. Bei dem Verfahren mit festen Tropfkörpern (Abb. 4) bilden die Mikroorganismen auf der Oberfläche einer Schüttung, z. B. aus Schlackensteinen, einen biologischen Rasen, der vom Abwasser unter Luftzutritt überrieselt wird.

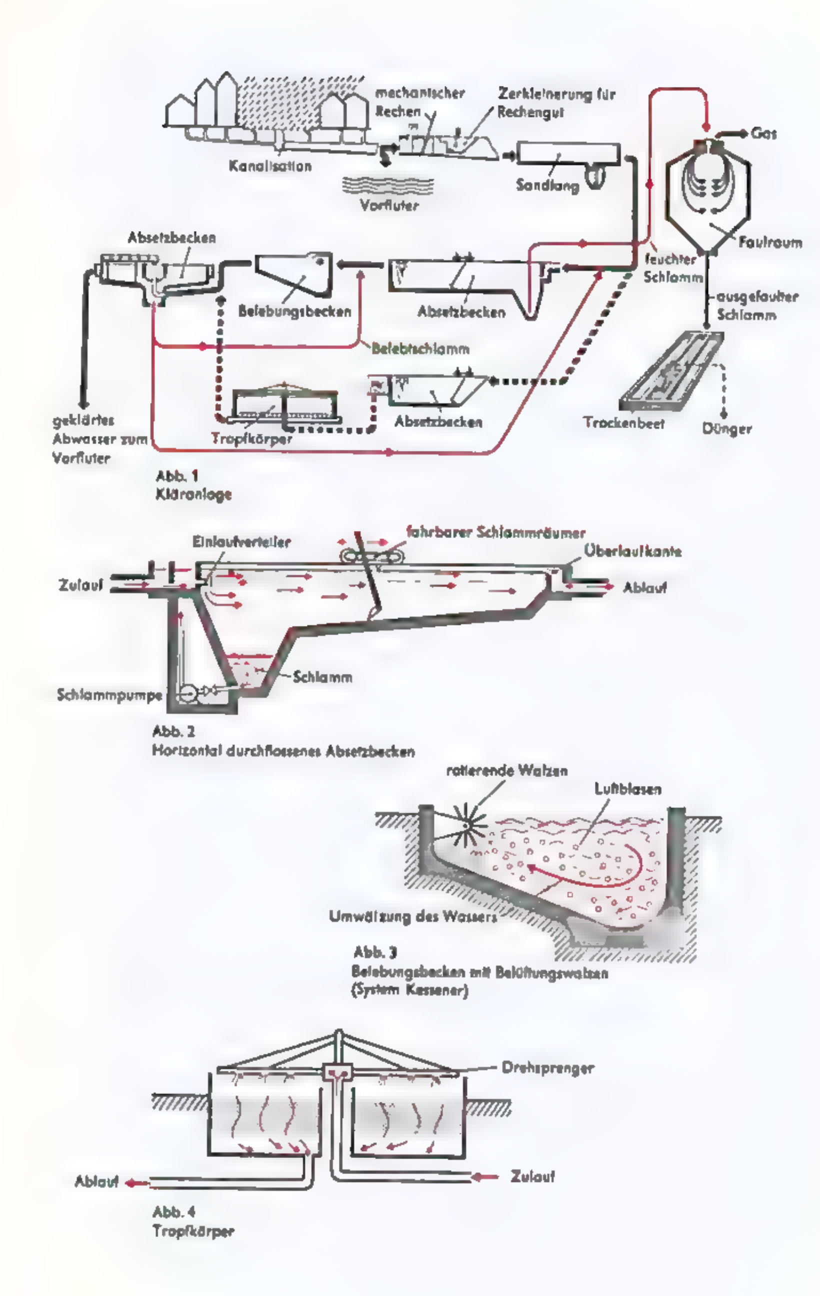


Abb. 1 Kläranlage

Abb. 2 Horizontal durchflossenes Absetzbecken

Abb. 3 Belebungsbecken mit Belüftungswalzen (System Kessener)

Abb. 4 Tropfkörper

WASSERAUFBEREITUNG

Vom Rohwasser mitgeführte Schwebestoffe lassen sich, wenn sie schwerer als Wasser sind, im Absetzbecken entfernen. Bei dem stetig (kontinuierlich) arbeitenden runden Absetzbecken (Abb. 1) strömt das Rohwasser über eine Leitung im Mittelpunkt des Beckens ein und durchfließt es waagerecht nach außen hin, um am Beckenrand in eine Auffangrinne überzulaufen. Die Fließgeschwindigkeit des Wassers ist so gering, 2 bis 10 mm/s, daß schwerere Teilchen zum Boden absinken ohne wieder aufgewirbelt zu werden. Ein ganz langsam umlaufender Schlammräumer fördert die abgesunkenen Feststoffe zur Beckenmitte, wo sie abgezogen werden. Schlecht sinkende Teilchen werden durch Zugabe von Flokkungsmittel zum Rohwasser, wie Aluminiumsulfat in leicht absetzbare Stoffe verwandelt. Das so vorgereinigte Rohwasser gelangt zum Entfernen von Bakterien und kleinsten Schmutzteilchen in ein Sandfilter. Der Sand des offenen Langsamfilters hat eine Korngröße von etwa 0,5—1,0 mm ∅ und ist etwa 0,7 bis 1,0 m hoch aufgeschüttet (Abb. 2). Das Wasser, das etwa 0,8 m über der Filterschicht aufgestaut ist, durchströmt die Sandschicht von oben nach unten mit einer Geschwindigkeit von etwa 0,1 m/Stunde. Es verläßt das Filter über im Filterboden angeordnete, mit Kies abgedeckte Öffnungen. Zum Reinigen wird das Filter außer Betrieb genommen, entleert, die oberste Filterschicht abgeschält, gewaschen und wieder aufgeschüttet. Das heute häufig angewandte offene Schnellfilter ist ähnlich dem offenen Langsamfilter (Abb. 2) aufgebaut. Zur Reinigung leitet man von unten her gereinigtes Wasser mit großer Geschwindigkeit durch die Sandschicht. Der Sand wird aufgeschwemmt und der an der Oberfläche der Sandkörnchen angelagerte Schmutz mitgerissen und abgeführt. Schnellfilter erlauben eine Filtergeschwindigkeit von etwa 5 m/s und sind bei gleicher Leistung kleiner als Langsamfilter. In einer Wasseraufbereitungsanlage sind meist mehrere solcher Filter nebeneinander angeordnet. Während der Reinigung des einen Filters sind die anderen in Betrieb. Dadurch ergibt sich ein stetiger Anfall filtrierten Wassers. Neben diesen offenen Filteranlagen sind auch geschlossene Schnellfilter üblich. Das Filtergehäuse ist ein geschlossener Stahl-Druckkessel. In diesem befindet sich im unteren Teil ein ebener Filterboden, der für den Wasserdurchtritt entweder mit Düsen oder nur mit runden Öffnungen versehen ist. Auf diesen Boden ist Quarzsand mit einer Korngröße von 1—1,5 mm ∅ etwa 2 m hoch geschüttet. Das unter Druck in den Kessel geleitete Wasser durchströmt den Filtersand von oben nach unten. Die Filtergeschwindigkeit beträgt meist 15 m/Stunde. Zur Reinigung muß das Filter außer Betrieb genommen und auf die beschriebene Weise rückgespült werden.

Enthält das Rohwasser mehr als 0,1 mg/l Eisen und mehr als 0,5 mg/l Mangan, dann müssen diese meist in Lösung befindlichen Metalle entfernt werden. Man überführt sie durch Oxidation mit Luftsauerstoff in unlösliche Verbindungen. Durch Versprühen wird eine große Wasseroberfläche geschaffen, die intensiv mit Luftsauerstoff in Berührung gebracht wird. Das meist senkrecht, 2—5 m hoch versprühte Wasser fällt auf einen Prallboden herab und fließt in ein darunter angeordnetes Reaktionsbecken (Abb. 3). Das Wasser verweilt dort etwa eine Stunde. Dabei bilden sich Flocken aus, die z. T. auf den Beckenboden absinken und dort stetig abgezogen werden. Das noch mit kleineren Flocken verunreinigte Wasser gelangt anschließend in ein Filter. Dort werden die restlichen Flocken dann in der Filterschicht zurückgehalten. Das gereinigte Wasser verläßt das Filter und wird in einem Reinwasserbehälter gesammelt und von dort den Verbrauchern zugeführt.

Die einfachste Entsäuerung des Rohwassers erfolgt z. B. im Riesler (Abb. 4). Im gut be- und entlüfteten Rieselraum wird das Wasser in Rinnen über Hürden des Rieslers gleichmäßig verteilt und durch wiederholten freien Fall auf den übereinander angeordneten Prallflächen der Hürden fein zerstäubt.

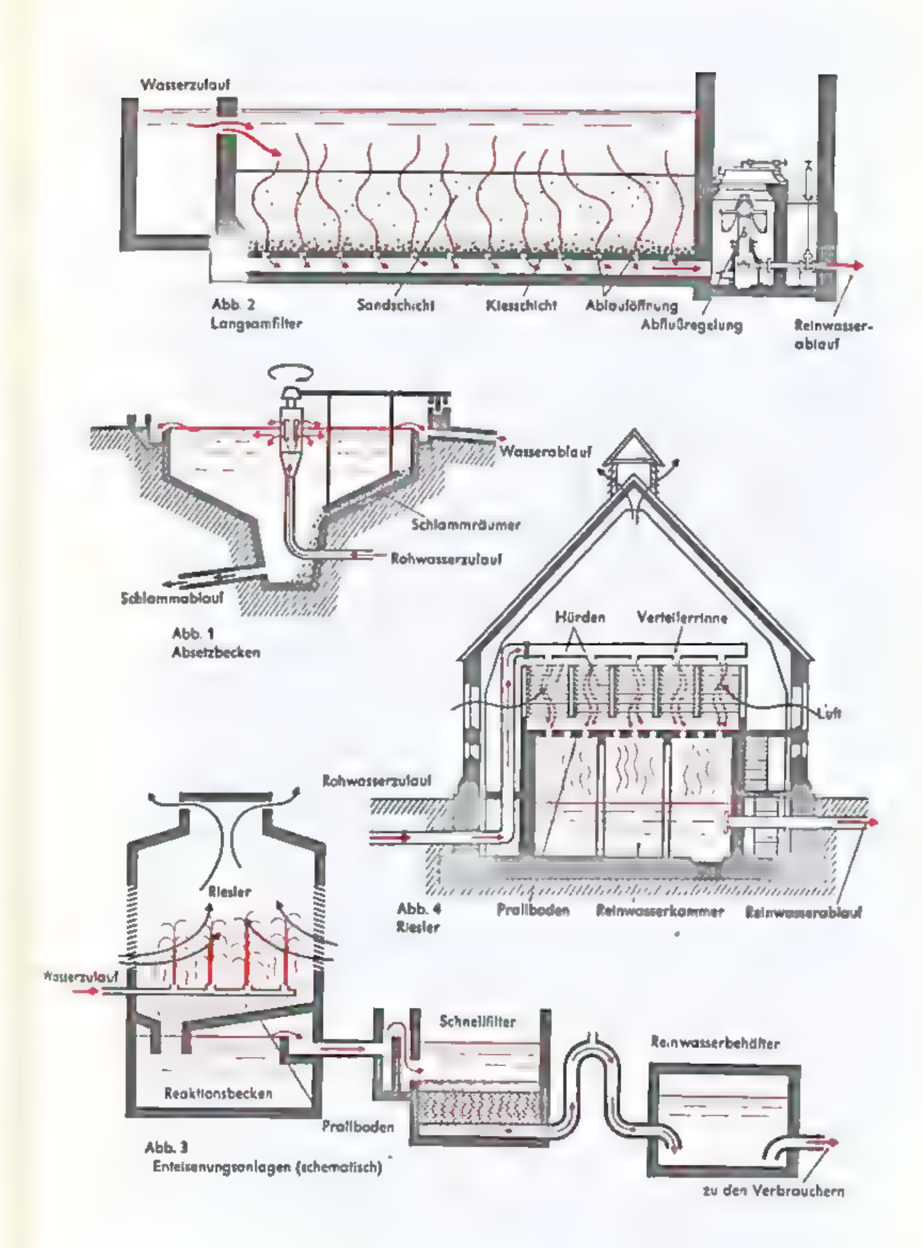


Abb. 2 Langsamfilter

Abb. 1 Absetzbecken

Abb. 4 Riesler

Abb. 3 Enteisenungsanlagen (schematisch)

BRUNNEN

Brunnenarten: Man unterscheidet allgemein den *vollkommenen Brunnen*, der durch den Grundwasserleiter bis zur darunter befindlichen undurchlässigen Schicht reicht, und den *unvollkommenen Brunnen*, der nur in den Grundwasserleiter eintaucht. Der *Schachtbrunnen* ist eine Anlage, bei der ein Schacht von etwa 1 bis 4 m Durchmesser auf die undurchlässige wassertragende Schicht abgeteuft wird. Das Wasser der wasserführenden Schicht tritt in der in diesem Bereich durchlässigen Wandung in das Innere des Schacht-Brunnens ein und wird von dort abgepumpt (Abb. 2). Am häufigsten werden Schacht-Brunnen nach dem Senkverfahren hergestellt: Auf einem unten spitz ausgeführten Senkkranz baut sich der Schachtkörper auf, der sich aufgrund seines Gewichtes absenkt, während aus seinem Inneren die Erdmassen entfernt werden; Werkstoffe für die undurchlässige Schachtwand sind Ziegelmauerwerk oder Stahlbeton. Die durchlässige Schachtwand besteht aus gesperrt gemauerten Ziegelschichten, Dränagerohren, Lochsteinen oder keramischen Formteilen. Meist wird der Boden des Schacht-Brunnens wasserundurchlässig ausgeführt. Der Brunnenschacht endet mindestens 0,3 m oberhalb des umgebenden Erdreiches und wird wasserdicht abgedeckt. Der *Bohrbrunnen (Rohrbrunnen)* wird bis zur wasserführenden oder wassertragenden Schicht vorgetrieben und erschließt Grundwasserströme. Mit dem Bohr-Brunnen kann im Gegensatz zum Schacht-Brunnen Grundwasser auch aus tiefergelegenen Schichten gefördert werden. Der einfachste Bohr-Brunnen ist der *abessinische Brunnen (Abessinierbrunnen)*. Der Brunnen besteht aus einem Stahlrohr von 25 bis 75 mm Durchmesser und ist am unteren Ende mit einer Rammspitze versehen. Das Rohr ist zum Durchtritt des Wassers auf etwa 1 m Länge gelocht und häufig mit einem Drahtgewebe umwickelt (Abb. 3); es wird meistens in den Boden gerammt. Wegen der Korrosions- und Verkrustungsgefahr baut man heute praktisch nur noch *Kiesfilterbrunnen*. Dabei muß der Brunnen mit einem so großen Bohrdurchmesser hergestellt werden, daß man zwischen Filterrohr und Bohrloch eine ausreichend starke Kiesschüttung einbringen kann; sie soll das Eindringen von Sand verhindern. Gelegentlich werden mehrere Kiesschichten unterschiedlichen Korndurchmessers eingebracht. Die Stärke der Kieselschicht soll mindestens 100 mm betragen. Da der kleinste Durchmesser der Filterrohre 300 mm betragen soll, beträgt beim Kiesfilter-Brunnen der kleinste Bohrdurchmesser 500 mm.

Eine moderne Bauform zur Erfassung und Förderung von Grundwasser aus nicht zu großer Tiefe ist der *Horizontalfilterbrunnen*. Der Horizontalfilterbrunnen bietet die Vorteile einer großen betrieblichen Einheit (Tagesleistung bis zu 30 000 m^3). Er besteht aus einem senkrechten Schacht mit meist 4 m Durchmesser (Abb. 4). Die Schachttiefe beträgt je nach der Tiefe der günstigsten wasserführenden Schicht 10 bis 40 m. Oberhalb des Schachtgrundes gehen sternförmig waagerecht in die wasserführende Schicht vorgetriebene Fassungsrohre (Durchmesser 150 bis 350 mm, Länge jeweils 30 bis 40 m) vom Schachtmantel aus. Jedes Fassungsrohr ist im Brunneninneren mit einem Schieber verschließbar, so daß der Wasserzufluß geregelt werden kann. Der Schacht wird zur Erdoberfläche meist durch ein Pumpenhaus abgeschlossen. Für das Vortreiben der horizontalen Filterrohre wurden verschiedene Verfahren entwickelt. Das älteste Verfahren (seit 1934) ist das nach *Ranney;* hierbei werden gelochte, 8 mm starke Stahlrohre mit einem Durchmesser von 200 mm sternförmig durch Schachtwandöffnungen hydraulisch in den Grund eingepreßt. Am vorderen Ende der Fassungsrohre ist ein geschlitzter Rohrkopf angebracht, durch den Grundwasser eintritt (bewirkt eine Entsandung des die Filterrohre umgebenden Grundes). Das *Fehlmann-Verfahren* arbeitet mit Bohrrohren, die in die wasserführende Schicht eingepreßt werden. In die Bohrrohre führt man die eigentlichen Filterrohre ein, wonach die Bohrrohre entfernt werden.

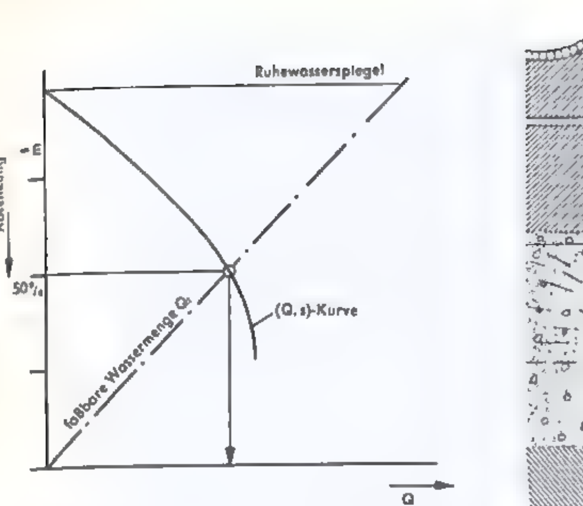


Abb. 1

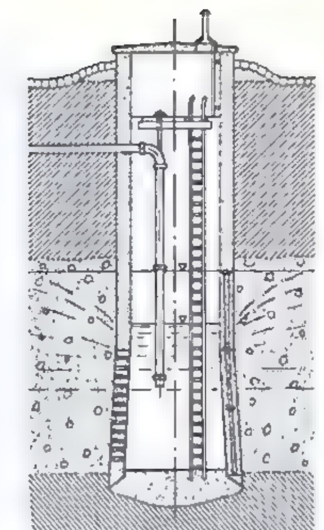


Abb. 2

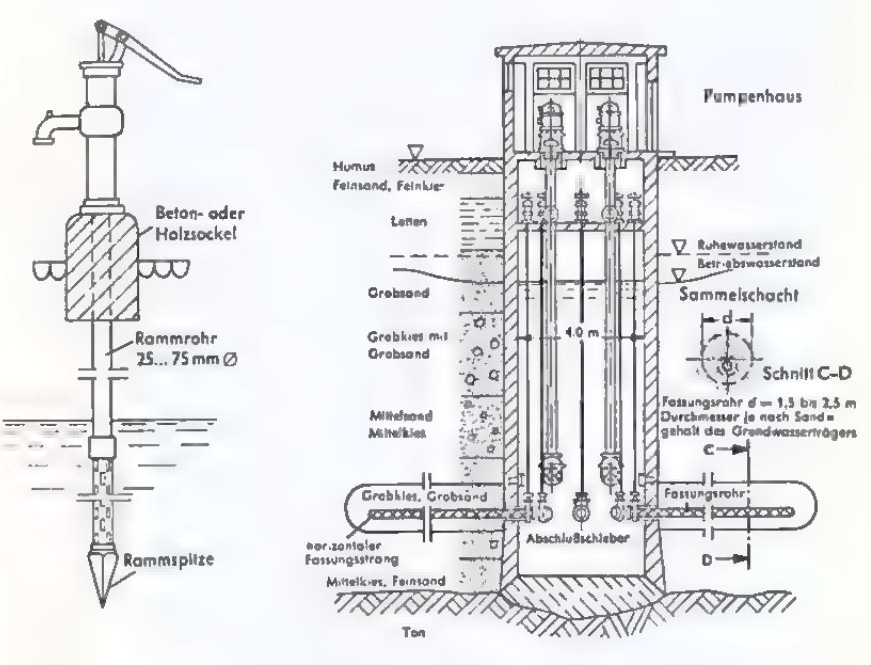


Abb. 3

Abb. 4

WEHRE

Wehre sind im Flußbett quer eingebaute Sperrenbauwerke, die v. a. die Erhöhung des natürlichen Wasserspiegels, ggf. die Regelung des aufgestauten Wassers und die Ableitung des Abflusses in einen künstlichen Kanal bezwecken. Die Speicherung spielt bei der Erstellung einer Wehranlage meistens eine untergeordnete Rolle, weil das Flußbett keinen bedeutenden Speicherraum bietet. Man unterscheidet zwischen festen Wehren (Wehren mit unbeweglichen Wehrkörpern), bei denen eine gezielte oder willkürliche Beeinflussung des Stauspiegels nicht oder nur begrenzt möglich ist, und beweglichen Wehren. Überfall-Wehre werden als gerade, schräge, gebrochene und Streich-Wehre gebaut.
Feste Wehre bestehen aus den in Abb. 1 dargestellten Bauteilen; die *Überfallmenge* Q [in m³/s] errechnet sich zu

$$Q = \frac{2}{3} \mu \cdot B \cdot \sqrt{2g} \, [(h + h_v)^{3/2} \, h_v^{3/2}]$$

(darin μ Überfallbeiwert [für abgerundete Wehrkronen ~ 0,85], B Wehrbreite [in m], g Fallbeschleunigung, h Überfallhöhe [in m], h_v [$=v^2/2$ g] Geschwindigkeitshöhe der Anströmung [in m]). Das *Heberwehr* entsteht dadurch, daß man über einen festen Wehrhöcker eine luftdichte „Haube" setzt und damit einen geschlossenen Heberschlauch erhält. Die Krone des festen Wehrhöckers liegt nur wenig unter dem Stauziel, so daß das Wasser im Heberscheitel den Stauspiegel übersteigt, wenn der Heber angesprungen ist. Das Gewicht der im abfallenden Teil des Heberschlauches befindlichen Wassersäule erzeugt dabei im Heberscheitel den erforderlichen Unterdruck (Abb. 2); es wird daher im Gegensatz zu den Überfall-Wehren die gesamte Heberfallhöhe zur Förderung genutzt.
Bei *beweglichen Wehren* (Abb. 3) können einzelne Wehrfelder ganz oder teilweise freigegeben werden. Die Vorteile beweglicher Wehre gegenüber festen Wehren bestehen darin, daß der Stauspiegel und der Durchfluß reguliert werden können; dadurch kann bei Hochwasserabfluß eine Stauspiegelerhöhung vermieden werden. Nachteile beweglicher Wehre können sein: höhere Kosten, Störanfälligkeit im Antrieb, leichtere Zerstörmöglichkeit, Behinderung der Bewegung bei Eisgang, Anfrieren der Dichtungen bei nur geringen Leckwassermengen, dauernd erforderliche Bedienung. Diese Nachteile sind heute teilweise aufgehoben durch moderne Antriebe (hydraulisch), beheizbare Dichtungsleisten, selbsttätige Steuereinrichtungen. Die beweglichen *Wehrverschlüsse* werden heute in erster Linie aus Stahl mit Gummidichtungen angefertigt, die *Antriebsarten* reichen vom Hand- bis zum hydraulischen Antrieb (als Notantrieb ist immer der Handantrieb vorzusehen).
Kombinierte Wehre sind aus festen und beweglichen Wehrteilen zusammengesetzt. Die bekannteste Bauweise ist das *Staubalkenwehr* (Abb. 4): Kostensparend wird ein fester Stahlbetonbalken mit beweglichen Aufsatzklappen und Unterschützen ausgestattet; als bewegliche Verschlüsse eignen sich besonders Schütze, Segmente und Klappen. Die Kombination aus festen Wehrrücken und beweglichen Aufsatzverschlüssen findet sich an vielen Hochwasserentlastungsanlagen von Talsperren (s. auch S. 292) oder an Wehren mit hohen Wehrhöckern.
Notverschlüsse werden bei Bewegungsstörungen der Hauptverschlüsse und bei Revisionsarbeiten eingesetzt, um damit einen ausreichenden trockenen Arbeitsraum schaffen oder die Wehröffnung abschließen zu können. Bauarten: *Dammbalken* aus Holz für kleine lichte Weiten und geringe Stauhöhen; Stahlträger werden für große lichte Weiten und Stauhöhen verwendet. *Dammtafeln* werden heute für kleinere und größere lichte Weiten anstelle von Dammbalken eingesetzt. Dammbalken und Dammtafeln werden in seitlichen Nischen geführt und schließen in ihrer Breite die gesamte Öffnung ab.

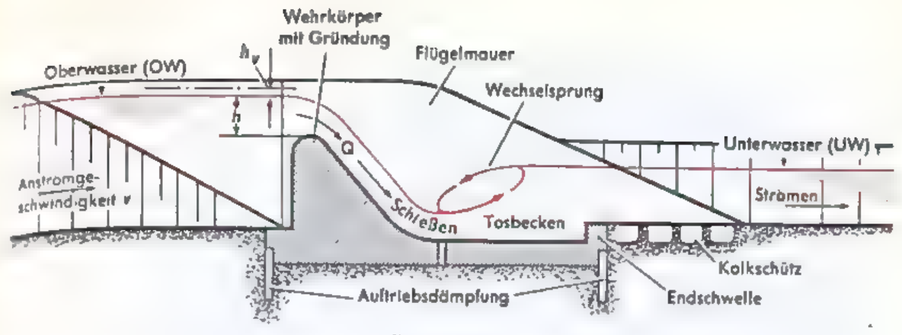


Abb. 1 Überfallwehr

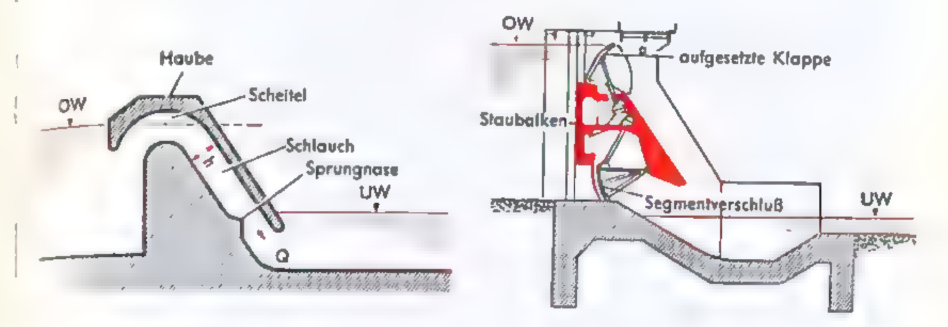


Abb. 2 Hebewehr

Abb. 4 Staubalkenwehr

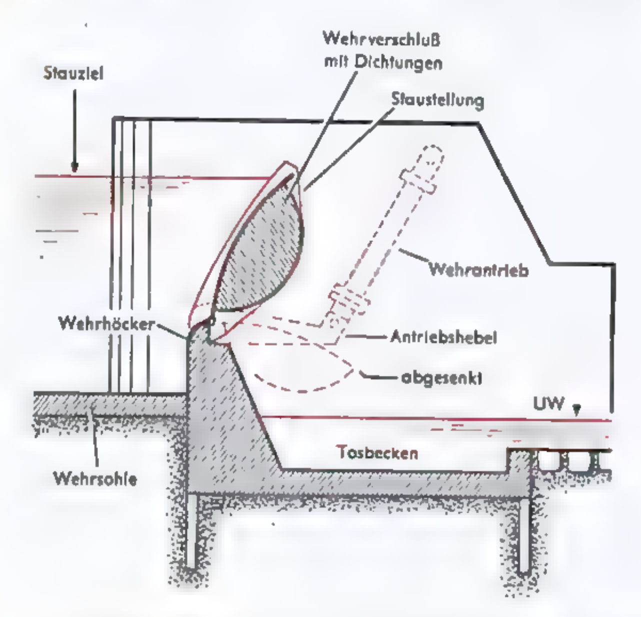


Abb. 3 Bewegliches Wehr mit ölhydraulisch angetriebener Fischbauchklappe

TALSPERRE

Talsperren sind Bauwerke, die als Talabschluß einen Stauraum zur Wasserspeicherung schaffen. Jede Talsperre besteht aus dem eigentlichen Sperrenbauwerk und den dazugehörigen Betriebsanlagen, zu denen die Betriebsauslässe oder Entnahmebauwerke, die Hochwasserentlastungsanlagen und die Grundablässe (die in Deutschland immer vorzusehen sind) gehören (Abb. 1). Das Sperrenbauwerk besteht aus der Staumauer oder dem Staudamm und gegebenenfalls einer Dichtungsschürze bis zur wasserundurchlässigen Schicht oder einem Dichtungsteppich auf der Beckensohle im Anschluß an die Dammdichtung.
Staumauern: Staumauern werden aus Bruchstein, Ziegel, Beton und Stahlbeton gebaut. Nach der statischen Wirkung (wie die Wasserbelastung in die Gründungssohle und die Talflanken weitergeleitet wird) unterscheidet man verschiedene Typen: Die *Gewichtsstaumauer* (Abb. 2 a) ist nach ihrer statischen Wirkung ein Kragträger, der als im Gründungsfels elastisch eingespannter Baukörper betrachtet wird. Sie wird aus voneinander durch wasserdichte Dehnungsfugen getrennten Mauerblöcken aufgebaut, wobei jeder Block für sich als selbständiger Baukörper betrachtet wird. Bei großen Höhen ist wegen der Dicke der Gewichtsstaumauer die Gefahr des Auftretens von Längsrissen und des Abreißens des wasserseitigen Fußes gegeben. Gewichtsstaumauern sollten daher nicht höher als 100 m gebaut werden.
Ein Teil der auftretenden Kräfte wird wie bei Gewichtsstaumauern durch Kragträgerwirkung auf die Sohle und der restliche Kräfteanteil durch Bogenwirkung auf die Talflanken übertragen. Mit der Steigerung der Bogenwirkung durch Verkleinerung des Bogenradius wächst die Materialersparnis gegenüber Gewichtsmauern. Bei großen Höhen ist jedoch auch hier die Dicke noch erheblich, so daß wiederum Längsrisse u. ä. infolge des Schwindens und der Baugrundverformung auftreten können. Dagegen weisen *Bogenstaumauern* (Abb. 2 b) durch die größere elastische Bogenwirkung eine zunehmende Unempfindlichkeit gegenüber Form- und Belastungsunregelmäßigkeiten auf.
Staudämme: Staudämme können im Gegensatz zu Staumauern auf jedem Baugrund errichtet werden, wenn mit wirtschaftlichen Maßnahmen in der Talsohle und den Talhängen genügend starke wasserundurchlässige Schichten erreicht werden können. Der Untergrund muß eine gute Tragfähigkeit aufweisen und darf keine wasserlöslichen Materialien oder organischen Stoffe enthalten. Gegen Über-, Unter- und Ausspülungen sind je nach der Bauart entsprechende Vorkehrungen zu treffen. Ungleiche Setzungen und Erschütterungen in erträglichen Maßen schaden Staudämmen weniger als Staumauern. Staudämme können als einheitliche Baukörper oder aus dichtenden und stützenden Teilen zusammengesetzt werden. Als Dammbaustoffe werden Erde, Kies, Geröll und Steine verwendet. *Geschüttete Erddämme aus einheitlichem Material* sind selten, da das Baumaterial geringe Durchlässigkeit und trotzdem einen großen Wert für die innere Reibung aufweisen muß. Da die Ausführung der Arbeiten äußerst sorgfältig erfolgen muß, wird diese Bauweise nur für kleinere Dämme vorgeschlagen. Bei *geschütteten Erddämmen mit Außendichtung* (Abb. 3 a) wird der größte Teil des Dammkörpers zum Tragen herangezogen. Die Dichtung aus bindigen Böden liegt schräg im wasserseitigen Dammteil und wird durch eine durchlässige Schicht geschützt. Man sucht damit die Nachteile einer wasserseitigen Dichtung wie Schäden durch Hitze- und Frosteinwirkung sowie äußere Einwirkungen und die Rutschgefahr einzuschränken. Steht bindiger Boden für eine Außendichtung nicht zur Verfügung, verwendet man z. B. Beton, Stahlbeton oder Asphaltbeton. Hinter der Dichtungsschicht ist ein Kiesfilter anzuordnen, um bei Schnellabsenkungen möglicherweise hinter der Dichtungsschicht befindliches Wasser schnell abführen zu können. Bei *geschütteten Erddämmen mit Kerndichtung* (Abb. 3 b) wird die Dichtung gut geschützt.

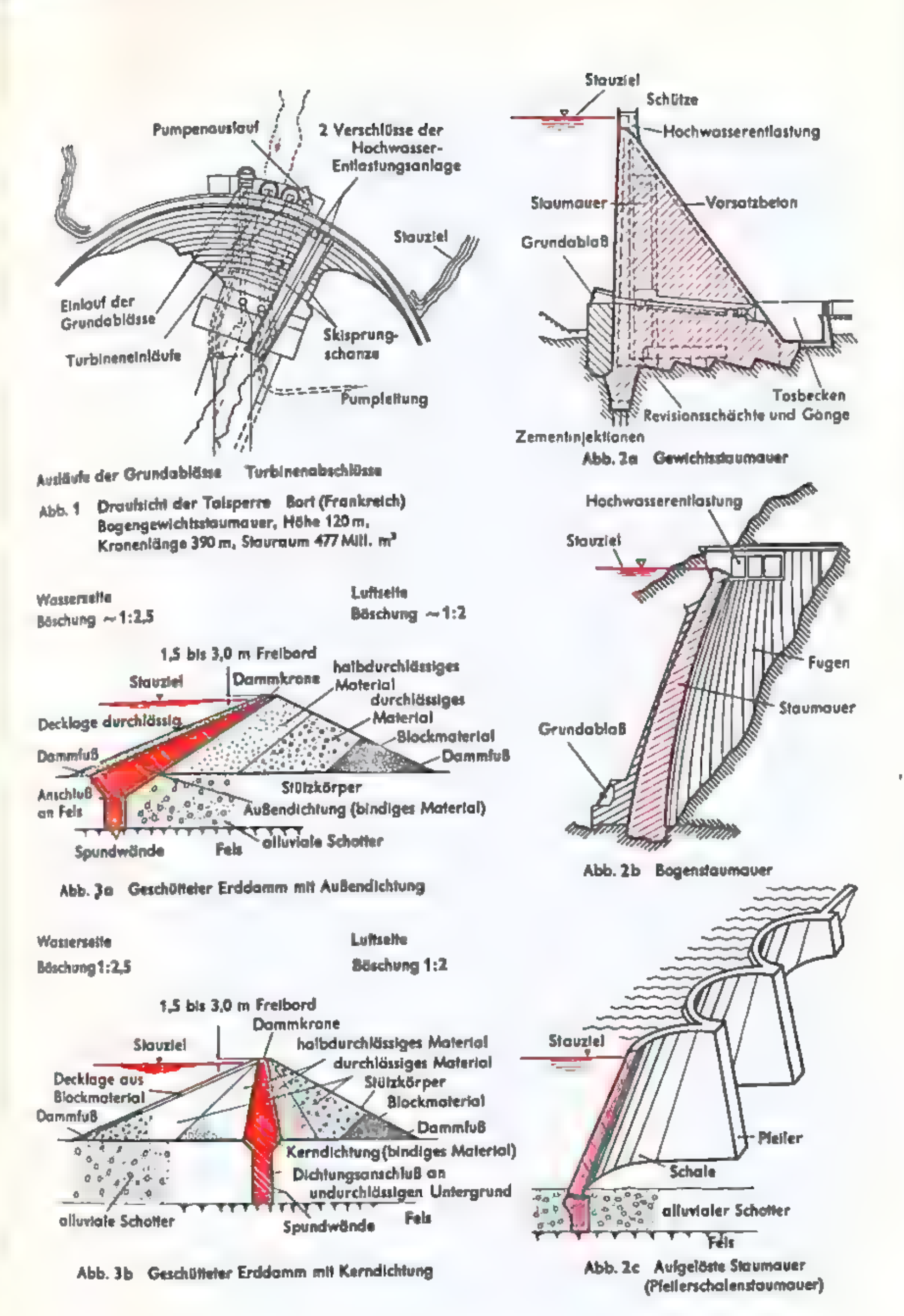


Abb. 1 Draufsicht der Talsperre Bort (Frankreich) Bogengewichtsstaumauer, Höhe 120 m, Kronenlänge 390 m, Stauraum 477 Mill. m³

Abb. 2a Gewichtsstaumauer

Abb. 2b Bogenstaumauer

Abb. 2c Aufgelöste Staumauer (Pfeilerschalenstaumauer)

Abb. 3a Geschütteter Erddamm mit Außendichtung

Abb. 3b Geschütteter Erddamm mit Kerndichtung

ELEKTROSTATIK I

Die Materie ist aus neutralen Atomen aufgebaut. Die elektrische Neutralität der Atome wird dadurch gewährleistet, daß sich die positiven Ladungen des Atomkerns mit den negativen der den Kern umgebenden Elektronen gerade kompensieren. Dabei kann das äußerste Elektron entweder in einer lockeren Bindung am übrigen Atomkomplex gebunden sein (Abb. 1a) oder aber fester in diesem Verband eingebettet liegen (Abb. 1). Atome der ersten Art neigen dazu, an Nachbaratome Elektronen abzugeben, die der zweiten Art, jenen Elektronen zu entreißen. Daher lädt sich z. B. Glas beim Reiben mit einem Seidentuch positiv auf (Abb. 2a), während Hartgummi nach dem Reiben mit einem Wollappen eine negative Aufladung zeigt (Abb. 2b). Lädt man zwei Kügelchen, die pendelförmig aufgehängt sind, mit gleichnamigen elektrischen Ladungen auf (indem man beispielsweise die Ladung eines durch Reibung aufgeladenen Stabes durch Berühren überträgt), so beobachtet man abstoßende Kräfte (Abb. 3a u. 3b). Ungleichnamige Aufladung führt zum Auftreten von Anziehungskräften (Abb. 3c) und bei Berührung der ungleichnamig geladenen Kügelchen zur Neutralisation (Abb. 3d). Positive Aufladung bedeutet Elektronenmangel, negative Aufladung Elektronenüberschuß gegenüber dem neutralen Zustand der Atome. Die Elektronen sind die Elementarteilchen der Elektrizität mit einer Ladung von $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb, einer Ruhemasse von $m_0 = 0{,}9108 \cdot 10^{-27}$ g und einem Radius von $2{,}82 \cdot 10^{-13}$ cm.

Da sich gleichnamige Ladungen abstoßen, ordnen sie sich so an die Oberfläche eines elektrischen Leiters (z. B. Metallkugel, Konduktor), daß in dessen Inneren ein ladungsfreier Raum entsteht, in dem keine elektrischen Kräfte wirken (Abb. 4a u. 4b). Bringt man einen geladenen Leiter in die Nähe eines ungeladenen (neutralen), so tritt auf letzterem eine Scheidung der Ladungen ein (Abb. 5a). Ist der erste Leiter positiv geladen, so lädt sich der ursprünglich neutrale Leiter auf der dem positiv geladenen Leiter zugewandten Seite negativ auf, während die abgewandte Seite die entsprechende positive Ladung trägt. Leitet man die Ladung – die abgestoßen wird – zur Erde ab (Abb. 5b), so bleibt der zweite, vorher neutrale Leiter negativ aufgeladen zurück (Abb. 5c). Man nennt diese Art von Aufladung *Influenz*. Die Abstoßung gleichnamiger Ladungen kann an stark gekrümmten Oberflächen (Spitzen) zu so hohen Abstoßungskräften führen, daß die Ladungsträger (Elektronen) den Leiter verlassen (Abb. 6) und z. B. auf einen neutralen Leiter aufgesprüht werden können, der sich dann entsprechend dem Vorzeichen der aufgesprühten Ladung (in unserem Fall negativ) auflädt.

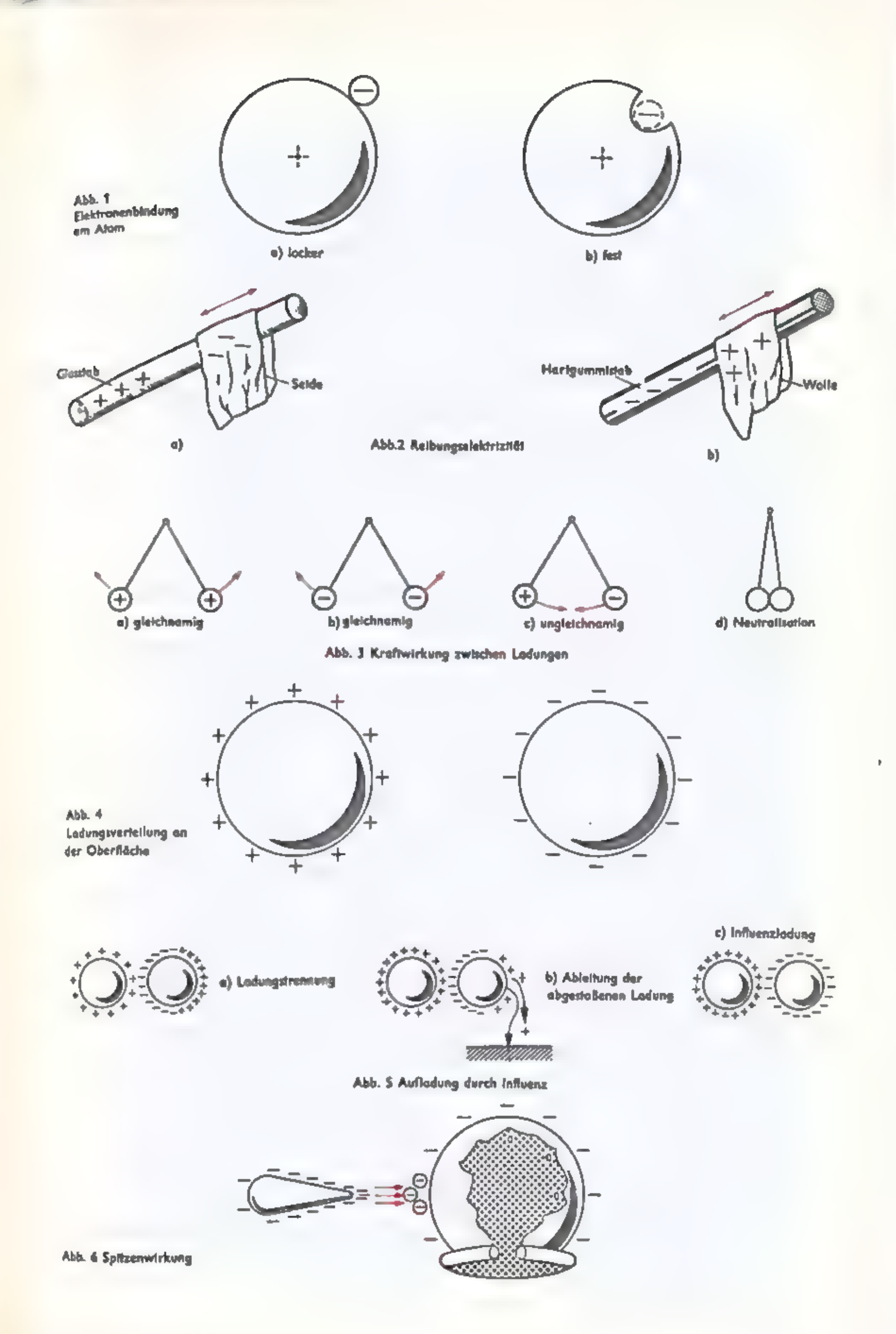


Abb. 1 Elektronenbindung am Atom

Abb. 2 Reibungselektrizität

Abb. 3 Kraftwirkung zwischen Ladungen

Abb. 4 Ladungsverteilung an der Oberfläche

Abb. 5 Aufladung durch Influenz

Abb. 6 Spitzenwirkung

ELEKTROSTATIK II

Der Van-de-Graaffsche Generator (Abb. 1) benützt die Möglichkeit, Ladungen aufzusprühen. Auf ein isolierendes Transportband wird Ladung aufgebracht, das Transportband trägt diese Ladung in das von elektrischen Kräften freie Innere einer leitenden Kugel von großem Radius. Dort werden mit spitzen Elektroden (Kamm) die Ladungen abgesaugt, die sich auf der Oberfläche des Leiters ansammeln und sehr hohe Aufladungen hervorrufen. Die Leistungen, die mit diesem Generator erzeugt werden können, sind nicht sehr hoch, weil die transportierten Ladungsmengen nur eine geringe Stromstärke aufrechterhalten können. Dafür lassen sich jedoch hohe elektrische Spannungen erzeugen, die bis in die Größenordnung einiger Millionen Volt gehen. Die Höhe der Spannung läßt sich dadurch steigern, daß man den Generator in eine Überdruckkammer stellt, so daß die Funkenüberschlagsspannung vom Leiter zu geerdeten Bauteilen erhöht wird. Das elektrische Fassungsvermögen eines Körpers an Ladung bezeichnet man als seine *Kapazität*. Eine Vorrichtung, deren Kapazität von geometrisch vorgebbaren bzw. veränderlichen Größen abhängt, nennt man einen *Kondensator*. Seine Aufnahmefähigkeit an Ladungen wird vor allem durch die Influenzwirkung bestimmt. Er besteht im Prinzip aus zwei einander isoliert gegenüberstehenden Flächen (Abb. 2a), deren Größe (F) und Abstand (d_1, d_2) geändert werden können. Wie man ohne weiteres einsieht, werden um so mehr Ladungen durch Influenz gebunden, je größer F und je kleiner d ist. Die Kapazität eines Plattenkondensators ist daher proportional F und umgekehrt proportional d. Man konstruiert daher Kondensatoren hoher Kapazität durch Aufeinanderwickeln von dünnen Metallfolien, die durch eine dünne Papierschicht als Isolator voneinander getrennt sind. Bringt man an einem Leiter ein kleines Kugelpendel an, so beobachtet man beim Aufladen des Leiters eine der Höhe der Aufladung proportionale Abstoßung des Kugelpendels (Abb. 3 a). Dieser Vorgang entspricht einem hydraulischen, bei dem man den Wasserdruck in einem Behälter erhöht und diesen Druck mittels eines U-förmigen Quecksilbermanometers mißt (Abb. 3b). Dem Druck im hydraulischen Falle entspricht im elektrischen die elektrische Spannung (gemessen in Volt). Mit der elektrischen Ladung Q (gemessen in Coulomb) und der elektrischen Kapazität C eines Leiters (gemessen in Farad) hängt die elektrische Spannung (U) nach folgender Beziehung zusammen: $U = Q/C$. In dem Raum, der einen elektrisch geladenen Körper umgibt, tritt eine elektrische Spannung auf, die proportional der Ladung Q und umgekehrt proportional der Entfernung r vom Körpermittelpunkt ist ($U \sim Q/r$). Den elektrischen Zustand, in den der Raum durch die Anwesenheit elektrisch geladener Körper versetzt wird, bezeichnet man als *elektrisches Feld* (Abb. 4). Verbindet man die Punkte gleicher Spannung (Potential), so ergeben sich Flächen gleichen Potentials (Äquipotentialflächen, Niveauflächen). Kräfte treten dann stets in Richtung des Potentialgefälles auf. Die Kraft, die im elektrischen Feld auf eine kleine „Probeladung“ ausgeübt wird, dividiert durch diese Ladung, nennt man die *elektrische Feldstärke*. Sie ist stets senkrecht zu den Niveauflächen gerichtet. Die Wirkungslinien der Feldstärke bzw. Kraft verbindet man zu Feld- bzw. Kraftlinien. Mittels der Potentialflächen und Feldlinien läßt sich das elektrische Feld beschreiben. Positive Ladungen sind Quellen, negative sind Senken von Feldlinien.

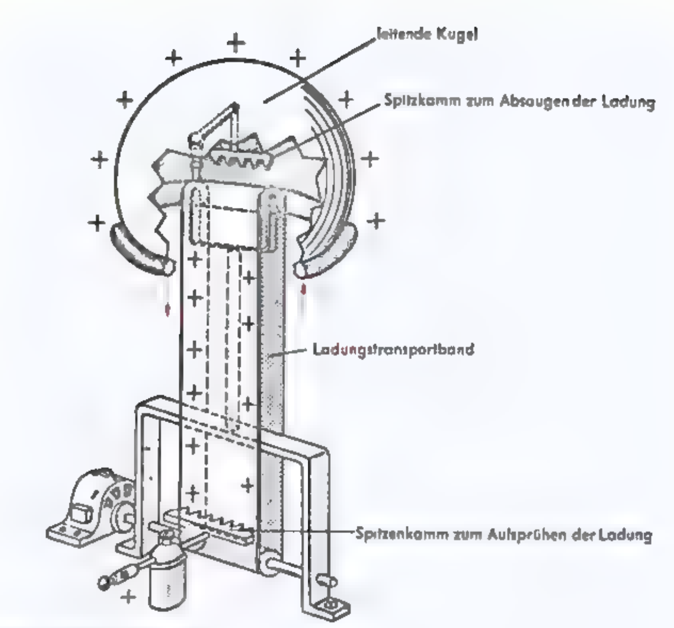
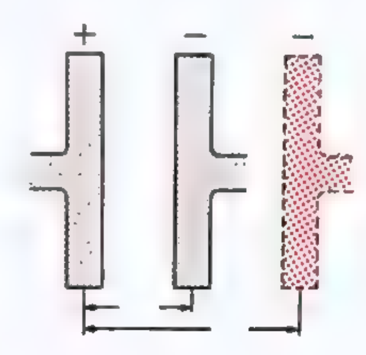


Abb. 1 Van-de-Graaffscher Generator



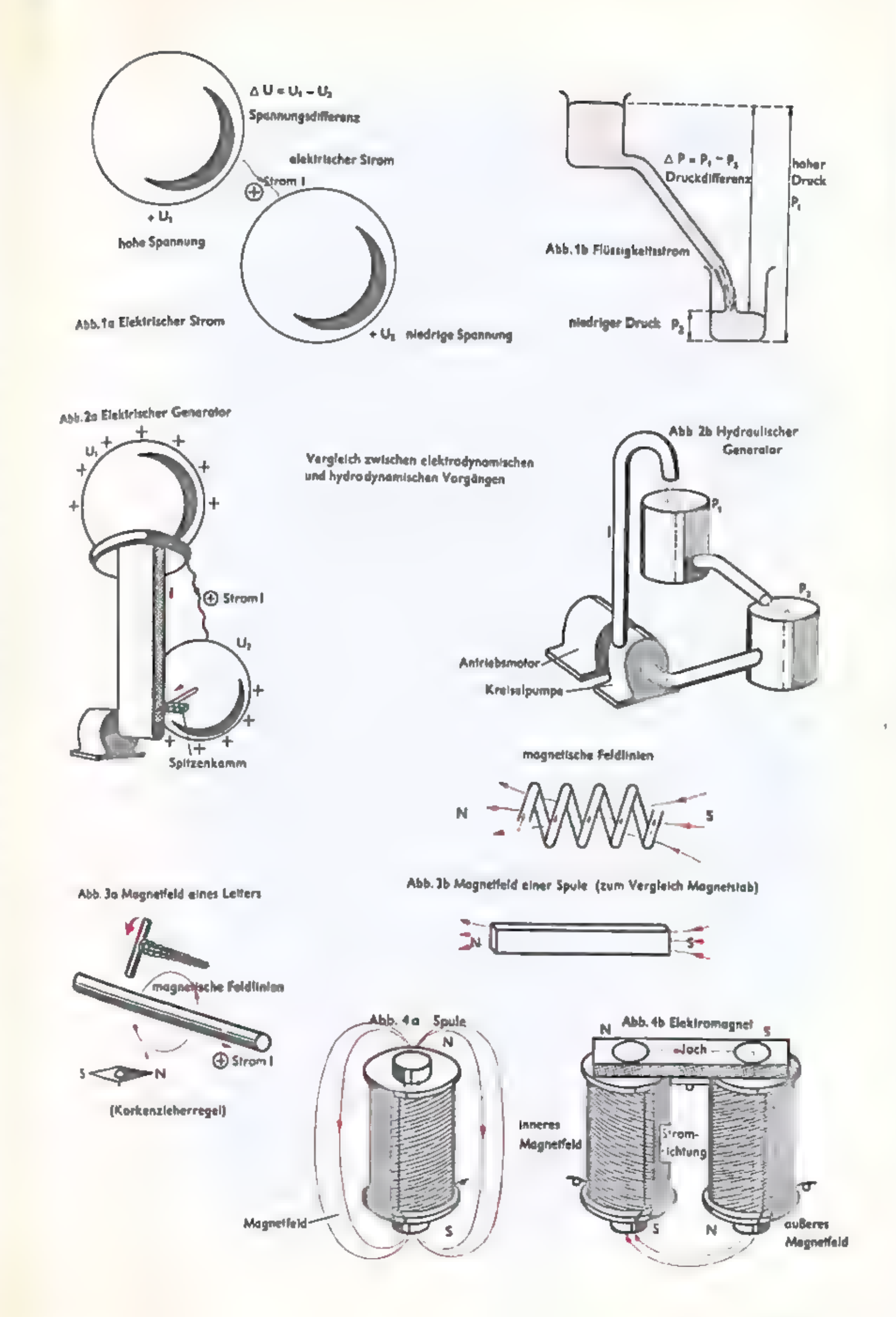






ELEKTRODYNAMIK I

Verbindet man zwei elektrostatisch verschieden hoch aufgeladene Leiter ($U_1 > U_2$) durch einen metallischen Draht miteinander, so tritt ein Ladungsausgleich in Gestalt eines elektrischen Stromes ein, bis beide Leiter das gleiche Potential angenommen haben (Abb. 1a). Diesem elektrodynamischen Vorgang entspricht im hydraulischen Vergleich der Übergang einer Flüssigkeitsmenge beim Bestehen eines Druckgefälles (Abb. 1b). Die Aufrechterhaltung einer Elektrizitätsströmung erfordert die Aufrechterhaltung der Spannungsdifferenz. Beim Van-de-Graaffschen Generator (s. S.296) geschieht dies durch die Arbeitsleistung, die mit dem Ladungstransport durch das Band verbunden ist (Abb. 2a). Im hydraulischen Fall tritt an die Stelle des Transportbandes eine Pumpe (bzw. ein Band mit Schöpfkellen; Abb. 2b). Abweichend vom Verhalten einer Flüssigkeitsströmung ruft die Elektrizitätsströmung in dem sie umgebenden Raum ein Magnetfeld hervor. Die Zuordnung zwischen Strom- und Magnetfeldrichtung prägt man sich am besten mittels der „Korkenzieherregel“ ein: Bewegt man den Korkenzieher im Sinne einer Rechtsschraube drehend in Richtung des Flusses positiver Ladungsträger, so gibt der Drehsinn die Richtung der den Leiter kreisförmig umgebenden magnetischen Feldlinien an. Die Existenz dieses Feldes läßt sich z. B. durch die Ablenkung einer Kompaßnadel nachweisen (Abb. 3a). Wickelt man einen geradlinigen Leiter zu einer Spule auf, so überlagern sich die kreisförmigen Feldlinien zu einem Magnetfeldverlauf, der dem eines Stabmagneten gleicht (Abb. 3b). Die magnetische Wirkung läßt sich noch verstärken, wenn man den magnetischen Feldlinienfluß durch eine Substanz leitet, die einen geringeren magnetischen Widerstand zeigt als Luft. Die geeignetste Substanz ist Eisen. Eine Spule mit Eisenkern nennt man einen Elektromagneten (Solenoid; Abb. 4a). Häufig verwendet man zwei Elektromagneten mit einem gemeinsamen Joch (Abb. 4b). Die Spulen haben dann entgegengesetzten Wicklungssinn, so daß nach je einer Seite ein freier Nord- und Südpol zeigt. Die Quelle der magnetischen Feldlinien ist der Nordpol, der Südpol ist ihre Senke. Der Magnetismus tritt stets in Gestalt von Doppelpolen (Dipolen) auf; freie positive und negative magnetische Ladungen wie im elektrischen Falle gibt es nicht.



ELEKTRODYNAMIK II

Die Vorgänge bei der Elektrizitätsströmung in metallischen Leitern lassen sich mit Hilfe der Wechselwirkung des Elektrons mit den Atomen der Metalle erklären. Man nimmt an, daß das Elektron kugelförmige Gestalt besitzt.
Als Beispiel für den metallischen Leiter soll Kupfer gewählt werden, das praktisch den am meisten verwendeten Elektrizitätsleiter darstellt. Kupfer besitzt eine kristalline Struktur (Abb. 1); der Atomkern des Kupfers trägt 29 positive Elementarladungen, die von 29 negativ geladenen Elektronen neutralisiert werden. Das 29. Elektron ist nur ganz locker an den Atomkern gebunden. Da bereits bei Zimmertemperatur die Wärmeenergie groß genug ist, um die Kupferatome Schwingungen um ihre Ruhelage im Kristallgitter ausführen zu lassen, werden dabei diese locker gebundenen Elektronen gewissermaßen abgeschüttelt und stehen als freie negative Ladungsträger für die Elektrizitätsleitung zur Verfügung. Sie sind *quasi-frei*, d. h., sie werden hin und wieder eingefangen, aber auch wieder freigemacht. Sie verhalten sich im Kristallgitter wie ein Gas in einem Behälter; man spricht daher auch vom „Elektronengas" (Abb. 2). Beim Anlegen einer Spannung bewegen sich die Elektronen vom negativen zum positiven Pol (Abb. 3). Der Elektronenstrom verläuft entgegen der als positive Stromrichtung definierten Strömung positiver Ladungsträger; dies ist stets zu beachten. Das Verhalten eines Elektronenstroms im Magnetfeld zeigt Abb. 4. Dort ist angenommen, daß ein einzelnes Elektron (etwa glühelektrisch im Vakuum ausgelöst) ein konstantes Magnetfeld durchquert. Die Überlagerung dieses Feldes mit dem des Elektrons führt unter den gezeichneten Verhältnissen oberhalb der Elektronenbahn zu einer Vergrößerung, unterhalb zu einer Verringerung der magnetischen Feldstärke. Dieses Feldstärkegefälle führt zu einer Krümmung der Elektronenbahn. Innerhalb eines Metalles tritt dadurch eine Spannungsdifferenz zwischen oberer und unterer Kante auf (Abb. 5). Man bezeichnet diese Erscheinung nach ihrem Entdecker als Hall-Effekt.
Mittels der Elektronentheorie der metallischen Leitfähigkeit ergibt sich auch eine anschauliche Erklärung der *Induktion*. Man versteht darunter das Auftreten elektrischer Spannungen und Ströme durch mechanische Bewegungen von Leitern im Magnetfeld. Nach Abb. 6 stellen wir uns ein Metallstück als einen mit Elektronengas gefüllten Behälter vor, den wir durch ein konstantes Magnetfeld bewegen. Dabei wird sich nach der Abb. die Elektronenkonzentration am unteren Ende gegenüber der am oberen erhöhen und damit eine Induktionsspannungsdifferenz mit dem negativen Wert am unteren Ende auftreten, weil die Elektronen — mechanisch mit der Geschwindigkeit v bewegt — nach unten gekrümmte Bahnen einschlagen. Verbindet man die Enden des Metallstückes durch eine Leiterschleife, die weit außerhalb des Magnetfeldes verläuft, so fließt in dieser — solange der Leiter durch das Magnetfeld bewegt wird — ein Induktionsstrom. Er fließt, solange sich der magnetische Fluß durch die Fläche der Stromschleife ändert. Man kann den Magnetfluß durch Änderung der durchflossenen Fläche (Anwendung beim elektrischen Generator) oder durch Änderung der magnetischen Feldstärke variieren (s. Transformator S. 318). Die prinzipielle Wirkungsweise des elektrischen *Generators* veranschaulicht Abb. 7a: Die vom konstanten Magnetfeld durchflossene Fläche der rotierenden Stromschleife ändert sich periodisch von 0 bis zu ihrem vollen Wert. Es entsteht eine Elektrizitätsströmung wechselnder Richtung, ein *Wechselstrom*, der über Schleifringe (Abb. 7b) einem äußeren Stromkreis zugeführt wird. Eine Gleichrichtung, d. h. eine Umformung in einen (pulsierenden) *Gleichstrom*, kann mittels eines in Lamellen (Abb. 7c) aufgeteilten Kollektors erfolgen. Primär wird demnach in einem praktisch verwendeten elektrischen Generator stets Wechselstrom erzeugt (vgl. S. 302).

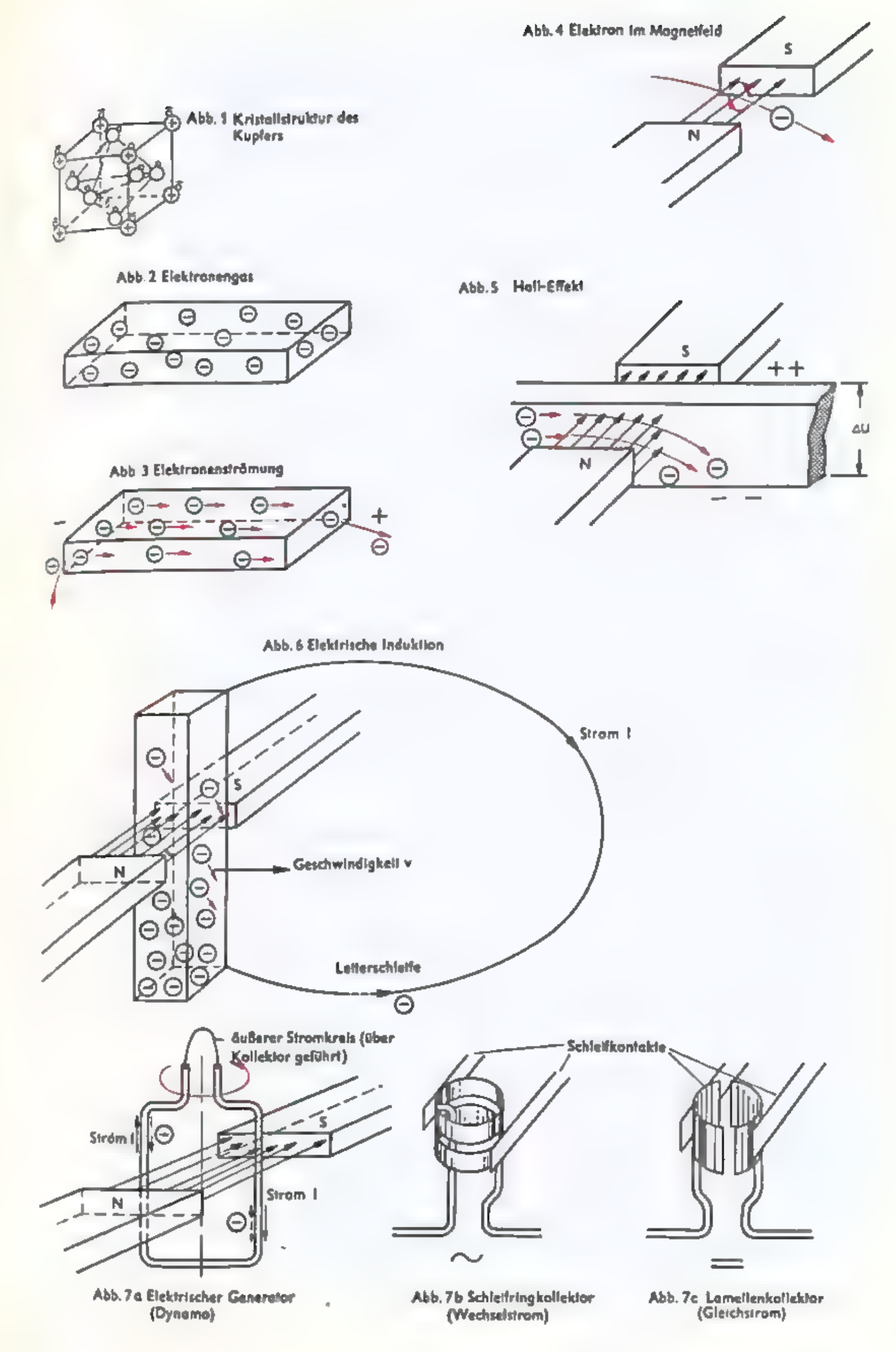


Abb. 7a Elektrischer Generator (Dynamo)

Abb. 7b Schleifringkollektor (Wechselstrom)

Abb. 7c Lamellenkollektor (Gleichstrom)

WECHSELSTROM, DREHSTROM

Bei der Gewinnung elektrischer Energie durch Induktion im elektrischen Generator entsteht primär eine Wechselspannung, die in einem äußeren Stromkreis Wechselstrom liefert (Abb. 1 a). Durch Kondensatoren und Spulen im Stromkreis können Phasenverschiebungen zwischen Spannung und Strom auftreten (Abb. 1b). Das Produkt aus Spannung und Strom ist dabei die elektrische Leistung. Dort, wo Spannung und Strom gleiches Vorzeichen haben, ist die Leistung positiv (Abb. 1 a): Beim Auftreten einer Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom entstehen immer dann, wenn Spannung und Strom verschiedene Vorzeichen haben, negative Leistungen, so daß die Wirkleistung (nutzbare Leistung) bei nicht in Phase liegendem Strom wegen der negativen Anteile kleiner ist (Abb. 1 b) als bei in Phase liegendem Strom (Abb. 1 a). Ist der Strom um eine Viertelperiode gegenüber der Spannung verschoben, so wird überhaupt keine Wirkleistung erbracht, obwohl die Leitungen durch die sog. Blindströme belastet sind. Die Verschlechterung der Leistung bei phasenverschobenen Strömen drückt man durch den Leistungsfaktor $\cos \varphi$ aus (elektrische Leistung $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$).

Drei Wechselströme, die in der Phase um 120° jeweils gegeneinander verschoben sind, zeichnen sich dadurch aus, daß die Summe ihrer Ströme bzw. ihrer Spannungen in jedem Zeitmoment Null ist (Abb. 2 a). Man braucht zu ihrer Fortleitung statt sechs Leitungen nur deren drei, wenn man sie entweder im Stern (Abb. 2 b) oder im Dreieck (Abb. 2 c) verkettet. Bei entsprechender geometrischer Anordnung der von einem solchen Strom gespeisten Elektromagnete (Abb. 2 d) nehmen die Ströme in den einzelnen Spulen (Elektromagneten) nacheinander um 120° phasenverschoben (vgl. Abb. 2 a) ihren größten Wert an, so daß sich in ihnen ein mit dem Strommaximum wanderndes und dadurch drehendes Magnetfeld aufbaut (daher nennt man diesen dreifach verketteten Wechselstrom „Drehstrom"). In diesem magnetischen Drehfeld kann man z. B. einen geschlossenen Käfiganker sich drehen lassen, so daß die Konstruktion von Drehstrommotoren äußerst einfach ist.

Man unterscheidet Wechselströme nach der Zeitdauer ihrer Periode bzw. deren reziprokem Wert, der Frequenz (d. h. der Wechselzahl je Sekunde; Einheit: 1 Hertz [Hz]). Man spricht von niederfrequentem Wechselstrom bis zu Frequenzen von 20 000 Hz*. Der gebräuchliche Wechselstrom im Netz der Energieversorgung hat 50 Hz, die Bundesbahn verwendet Wechselstrom von $16^2/_3$ Hz. Wechselströme hoher Frequenzen bis zu einigen GHz (Gigahertz = 10^9 Hz = 1 Milliarde Hertz) finden in der Nachrichtentechnik und dort speziell in der Funktechnik Verwendung.

* Übliche Einteilung der Frequenzbereiche: Niederfrequenz bis 20 000 Hz, Mittelfrequenz bis 300 000 Hz, Hochfrequenz bis 3 000 MHz, darüber Höchstfrequenz.

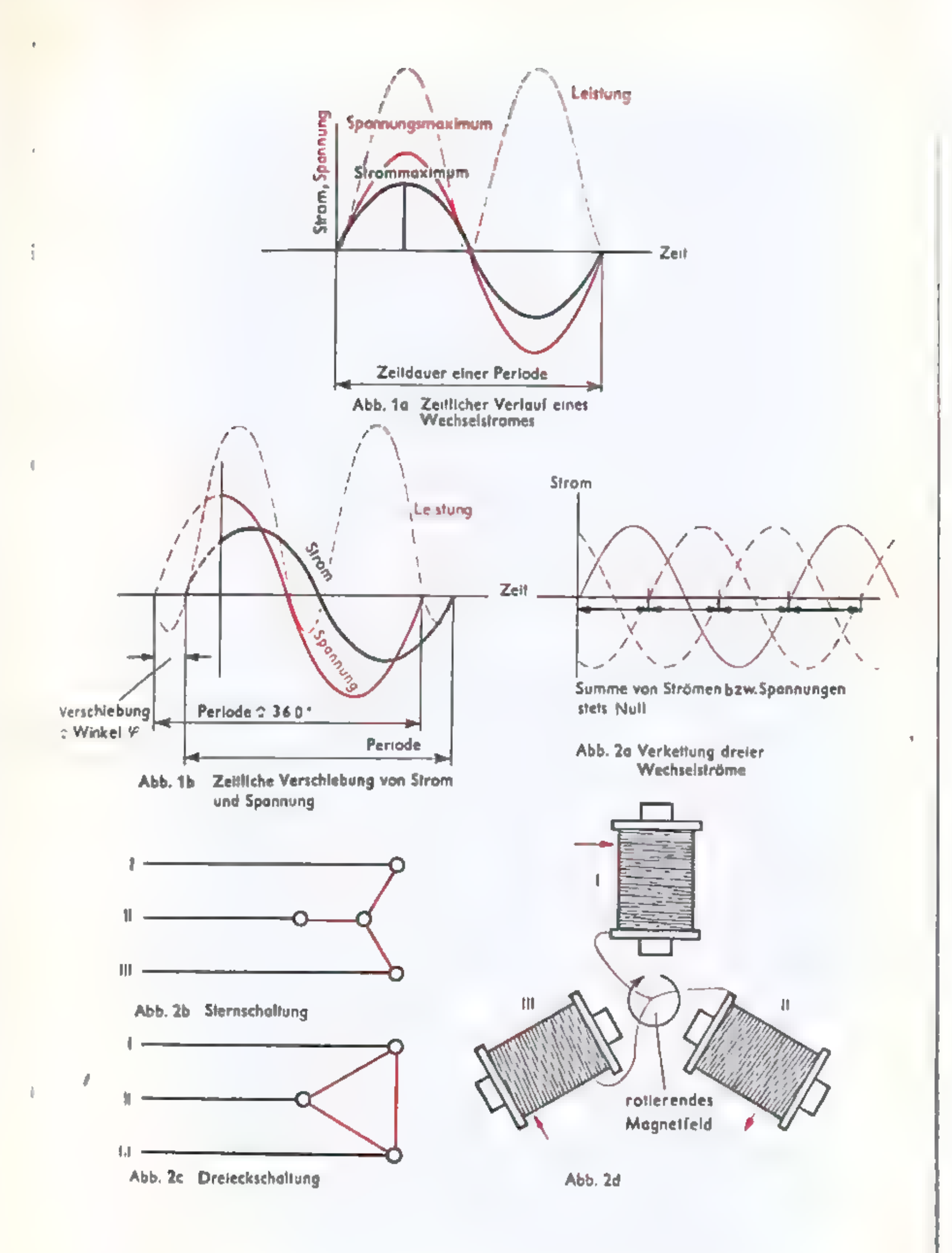


Abb. 1a Zeitlicher Verlauf eines Wechselstromes

Abb. 1b Zeitliche Verschiebung von Strom und Spannung

Abb. 2a Verkettung dreier Wechselströme

Abb. 2b Sternschaltung

Abb. 2c Dreieckschaltung

Abb. 2d

ELEKTROMAGNETISCHE WELLEN

Die Entstehung elektromagnetischer Wellen geht stets auf das Vorhandensein eines hochfrequenten Wechselstromes zurück. Der Abstrahlungsvorgang ist am deutlichsten am Hertzschen Dipol zu veranschaulichen (Abb. 1). Dies ist ein Leiterstück, dessen Länge klein ist zur Periodenlänge der entstehenden elektromagnetischen Welle. Man erhält diese auch *Wellenlänge* genannte Größe, wenn man die Ausbreitungsgeschwindigkeit (Weg je Sekunde) durch die Frequenz (Schwingungs- bzw. Wechselzahl je Sekunde) dividiert. Wird dieses Leiterstück von einem hochfrequenten Wechselstrom durchflossen (den man z. B. durch Induktion in ihm erzeugen kann), so bildet sich darum ein hochfrequentes elektromagnetisches Wechselfeld aus, wie es Abb. 1 a zeigt. Die Ablösung elektromagnetischer Wellen im kritischen Abstand r_k aus den oben dargelegten Gründen zeigt Abb. 1 b. Einen Stromkreis, der in bezug auf seine elektrischen (Kapazität) und magnetischen (Selbstinduktion) Eigenschaften auf die Frequenz des Wechselstromes abgestimmt, d. h. mit ihm in Resonanz ist, nennt man einen *Schwingkreis*. Dieser besteht aus einem Kondensator und einer Selbstinduktionsspule. Einmal aufgeladen, entlädt sich der Kondensator über die Spule, seine elektrische Energie setzt sich in magnetische um. Nach Entladung des Kondensators bricht das Magnetfeld zusammen und induziert in der Spule einen Strom, der den Kondensator umgekehrt auflädt. Wären keine Verluste vorhanden, so würde die Ladung unbegrenzt hin- und herpendeln. Die Frequenz dieser Pendelung und damit des entstehenden Wechselstromes ist um so höher, je kleiner die Kapazität C und die Selbstinduktion L sind (Abb. 2 a). Für die Schwingungsdauer T (Zeitdauer einer Periode) gilt die Thomsonsche Gleichung $T = 2\pi \cdot \sqrt{LC}$. — Durch Öffnen des Kondensators (Abb. 2 b) erhält man den Übergang zur Antenne (Abb. 2 c u. 2 d). In diesen Fällen nutzt man das elektrische Feld des Kondensators für die Abstrahlung bzw. für den Empfang der elektromagnetischen Energie in Gestalt von Wellen aus. Eine auf einen Rahmen gespannte Spule (Peilrahmen) kann man zum Empfang des magnetischen Feldanteiles nach Abb. 1 c benutzen (Abb. 2 e). Beim Peilen dreht man den Rahmen so, daß maximale Änderung des magnetischen Flusses eintritt.

Für die Erzeugung höchstfrequenter Schwingungen ist der Hohlraumresonator ein wichtiges Bauelement. In Abb. 2 f ist gezeigt, wie man sich einen Hohlraumresonator aus einem Schwingkreis kleinster Kapazität und Selbstinduktion entstanden denken kann. Dabei entsprechen jeweils die Mäntel der Induktion und die Deckel der Kapazität.

Schwingkreise dienen als Abstimmungsorgane, in Gestalt von Antennen als Sende- und Empfangsvorrichtungen für elektromagnetische Energie in den Funksendern bzw. Empfängern. Da die Abstrahlung von elektromagnetischen Wellen beim Sender dessen Schwingkreis laufend Energie entzieht, ihn also dämpft, muß ihm fortwährend Energie zugeführt werden. Dies geschieht mittels einer Triode oder eines Transistors in Rückkopplungsschaltung. Mit Hilfe eines geeignet geschalteten Mikrophons wird die abgestrahlte Welle amplituden- bzw. frequenzmoduliert. Unter Modulation versteht man in der Funktechnik das Überlagern der vom Sender erzeugten Trägerschwingungen mit den zu übertragenden Stromschwankungen oder Impulsen. Während bei der Amplitudenmodulation die Schwingungsweite der hochfrequenten Trägerschwingungen beeinflußt wird, ändert sich bei der Frequenzmodulation die Frequenz der Trägerschwingungen im Takt der zu übertragenden Nachricht. Beim Empfänger wird der Schwingkreis auf die Frequenz der eintreffenden Welle abgestimmt, deren Energie im Schwingkreis einen im Gleichtakt verlaufenden hochfrequenten Wechselstrom entstehen läßt. Die dem Gleichstrom überlagerte hochfrequente Wechselstromkomponente wird nach der Demodulation (Gleichrichtung) und Verstärkung einem Lautsprecher zugeführt.

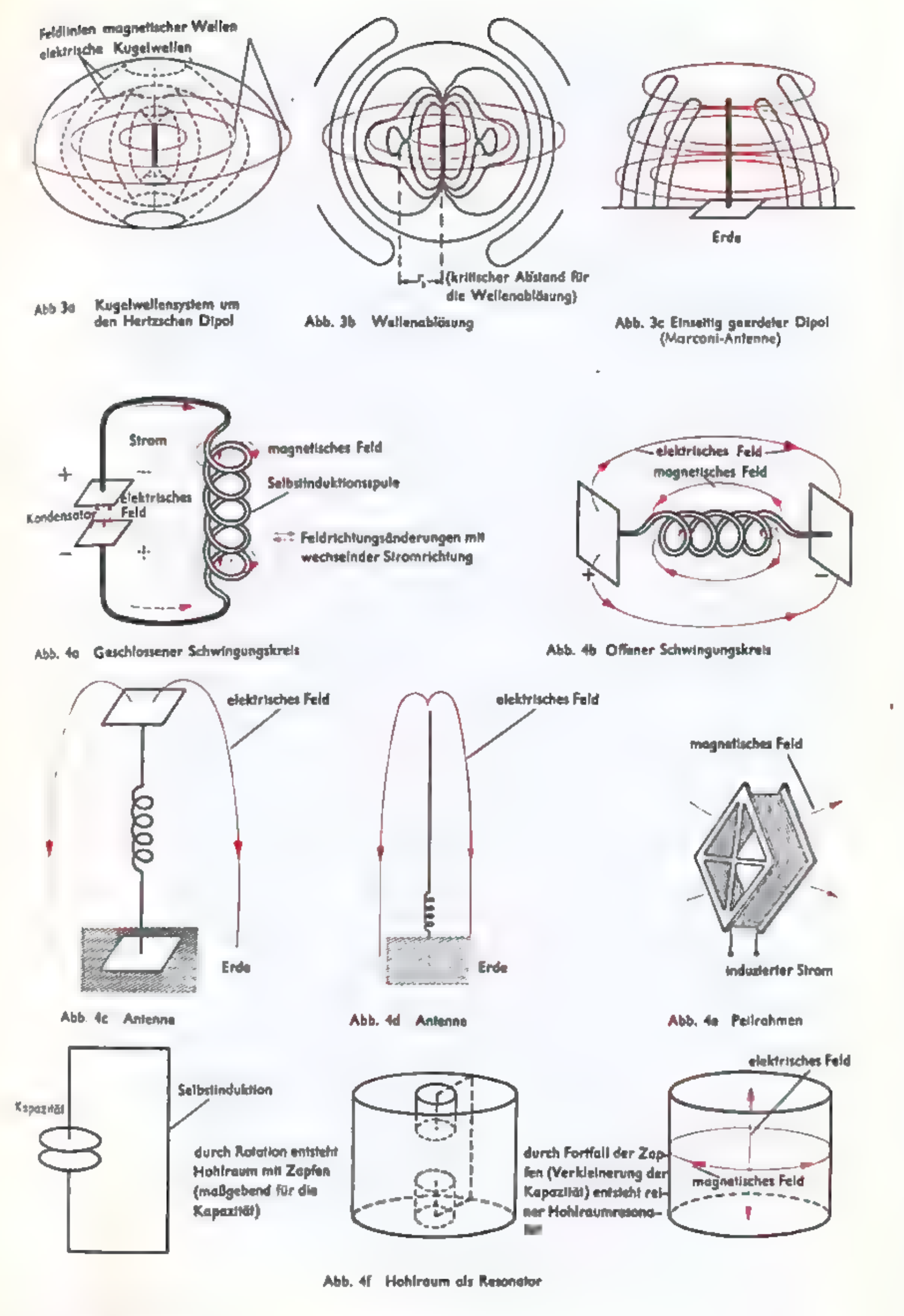


Abb. 3a Kugelwellensystem um den Hertzschen Dipol

Abb. 3b Wellenablösung

Abb. 3c Einseitig geerdeter Dipol (Marconi-Antenne)

Abb. 4a Geschlossener Schwingungskreis

Abb. 4b Offener Schwingungskreis

Abb. 4c Antenne

Abb. 4d Antenne

Abb. 4e Peilrahmen

Abb. 4f Hohlraum als Resonator

BATTERIE, AKKUMULATOR (GLEICHSTROM)

Taucht man zwei verschiedene Metalle in eine den elektrischen Strom leitende wäßrige Lösung (z. B. verdünnte Schwefelsäure), so haben sie eine unterschiedliche Tendenz, in Lösung zu gehen; dabei laden sie sich verschieden elektrisch auf. Aufgrund dieses chemischen Vorganges tritt eine Spannungsdifferenz auf, weil das eine Metall gegenüber dem anderen negativ oder positiv erscheint. Es läßt sich daher nach Volta eine Spannungsreihe der Metalle aufstellen, in der das jeweils vorhergehende Metall (bzw. der elektrische Leiter) beim Eintauchen in eine wäßrige Lösung stets positiver erscheint als das folgende: Kohle, Gold, Silber, Kupfer, Zinn, Blei, Eisen, Zink.
Eine Kombination zweier Metalle in wäßriger Lösung zur Gewinnung elektrischer Energie aus chemischer nennt man ein galvanisches Element. Beim Voltaschen Element (Abb. 1) tauchen Kupfer (+) und Zink (—) in verdünnte Schwefelsäure. Schließt man an die Pole z. B. eine Glühlampe an, so fließt ein elektrischer Strom. Der Stromkreis, der außen über die Glühlampe läuft, wird im Innern durch die leitende Flüssigkeit, den Elektrolyten, geschlossen. Der Strom im Inneren des Elementes führt zum Auftreten von Gasschichten an den Elektroden (Polarisation), welche den inneren Widerstand erhöhen und dadurch die chemisch erzeugte elektrische Spannung und damit die Stromausbeute herabsetzen. Insbesondere ist es der am Pluspol (Anode) entstehende Wasserstoff, der unschädlich gemacht werden muß. Dies geschieht beim Salmiakelement (Abb. 2) mittels eines Gemisches aus Braunstein (Manganoxid) und Graphit als Depolarisatoren, das in einem Leinwandbeutel die Kohleanode umgibt. Ein solches Element wird gegenwärtig noch in Klingelanlagen gelegentlich verwendet. Es besteht aus einer Kohleanode mit Depolarisator, einem Minuspol (Kathode) aus Zink und einer wäßrigen Salmiak-(Ammoniumchlorid-)Lösung als Elektrolyt. Die Spannung des Salmiakelementes liegt bei 1,3 Volt. Die Größe des Elementes ändert nichts an seiner Spannung, hat jedoch entscheidenden Einfluß auf die Stromstärke, die man ihm entnehmen kann. Beim Betrieb wird die chemische Energie, die sich in elektrische umsetzt, dadurch gewonnen, daß Zink in Lösung übergeht. Daher wird die Zinkelektrode zersetzt. Dieser Vorgang kann nicht rückgängig gemacht werden. Man muß daher die Zinkelektrode von Zeit zu Zeit erneuern. Auch der Depolarisator verbraucht sich und erfordert gelegentlich Ersatz. Elemente, bei denen die Elektroden verbraucht werden, nennt man Primärelemente, im Gegensatz zu den Sekundärelementen, bei denen durch Zufuhr elektrischer Energie (Aufladen) der ursprüngliche Zustand wieder hergestellt werden kann, die Elektroden also regeneriert werden. Man nennt solche Elemente Akkumulatoren. Üblicherweise bestehen sie aus Bleiplatten in verdünnter Schwefelsäure (Abb. 3 u. 4). Es bildet sich auf den Platten eine Bleisulfatschicht. Beim Aufladen wird die Schicht auf der Anodenplatte in braunes Bleidioxid verwandelt, während die Kathode zu grauem Blei reduziert wird. Die elektrische Energie wird in chemische Energie umgesetzt. Blei- und Bleidioxidelektroden wirken zusammen mit dem Elektrolyten als galvanisches Element. Es tritt eine Rückumwandlung der gespeicherten (akkumulierten) chemischen Energie in elektrische ein (Entladen). Der Akkumulator wird in der Technik vielfach verwendet. Außer dem Bleiakkumulator kennt man noch den Eisen-Nickel-Akkumulator mit Kalilauge als Elektrolyt. Der Bleiakkumulator besitzt eine Spannung von etwa 2 Volt, der Eisen-Nickel-Akkumulator eine solche von 1,36 Volt. Sowohl Primär- als auch Sekundärelemente werden auch als sogenannte „Trockenelemente" gebaut. Sie unterscheiden sich von den oben beschriebenen dadurch, daß der Elektrolyt zu einer Paste eingedickt ist. Höhere Spannungen erreicht man durch Hintereinanderschalten (Abb. 5), größere Stromergiebigkeit durch Parallelschalten (Abb. 6) der Elemente. Alle Elemente liefern Gleichstrom, d. h. einen elektrischen Strom, der konstant in der gleichen Richtung fließt (im Gegensatz zum Wechselstrom; s. S. 300).

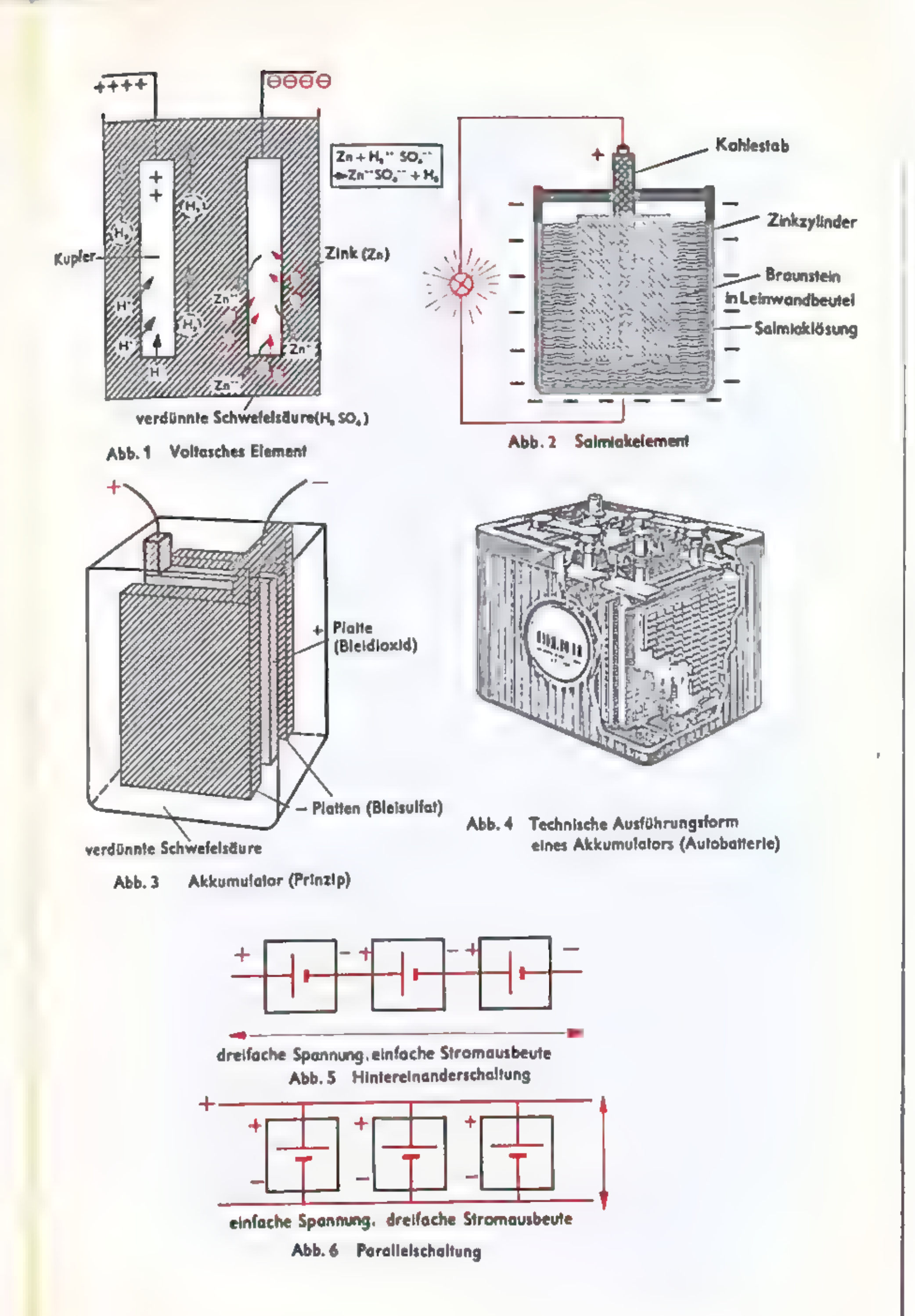


Abb. 1 Voltasches Element

Abb. 2 Salmiakelement

Abb. 3 Akkumulator (Prinzip)

Abb. 4 Technische Ausführungsform eines Akkumulators (Autobatterie)

Abb. 5 Hintereinanderschaltung

Abb. 6 Parallelschaltung

ELEKTROMAGNETE

Die Wirkung eines Eisenmagneten beruht auf einer teilweisen Ausrichtung von kleinen, magnetisierten Gebieten in seinem Innern, den sogenannten Weißschen Bezirken (Abb. 1). Da diese Ausrichtung mit steigender Temperatur immer schwieriger wird (Wärmebewegung der Atome), erhält man bei Zimmertemperatur nur Magnetfelder von einigen kG[auß]. Stärkere Magnetfelder lassen sich nur mit Elektromagneten erzielen. Diese beruhen darauf, daß ein Strom in seiner Umgebung ein Magnetfeld erzeugt. Wickelt man einen isolierten Kupferdraht in Schraubenwindungen einlagig oder in mehreren Lagen übereinander, z. B. auf ein Plexiglasrohr (Abb. 3), und läßt dann durch den Draht einen Gleichstrom fließen, so hat man einen Elektromagneten. Da jede einzelne Drahtwindung als kreisförmiger Leiter angesehen werden darf, kann das Magnetfeld einer derartigen stromdurchflossenen Drahtspule als die Superposition der Magnetfelder von lauter Kreisströmen (Abb. 4) aufgefaßt werden: Im Innern der Spule ist es ziemlich homogen, d. h. überall von gleicher Stärke und Richtung (Abb. 5), und zwar auf einem um so größeren Bereich, je länger die Spule ist (und je dichter die Wicklungen liegen). Die magnetische Feldstärke $\vec{H}$ hat hier ihren stärksten Wert: $H = 0{,}4\,\pi\,NI/l = 0{,}4\,\pi\,nI$ (in Örsted), wobei I die Stromstärke (in Ampere), l die Länge der Spule (in cm), N die Gesamtzahl der Windungen bzw. $n = N/l$ die Zahl der Windungen pro cm ist. Die magnetischen Feldlinien verlaufen hier fast geradlinig und parallel zueinander. Außerhalb der Spule entfernen sie sich voneinander, so daß mit wachsendem Abstand das Magnetfeld rasch schwächer wird. Alle Kraftlinien des Magnetfeldes einer Spule sind in sich geschlossen (Abb. 5). Das Feld im Außenraum stimmt mit dem Feld eines stabförmigen Dauermagneten überein: Der Südpol dieses Elektromagneten liegt auf der Seite, von der aus gesehen der Strom in den Wicklungen im Uhrzeigersinn fließt (Abb. 5).

Sobald das Magnetfeld irgendein Material durchsetzt, hat man außer der magnetischen Feldstärke $\vec{H}$ noch die magnetische Induktion $\vec{B} = \mu\,\vec{H}$ zur Beschreibung heranzuziehen: Sie hat überall die gleiche Richtung wie $\vec{H}$, unterscheidet sich aber von der magnetischen Feldstärke um einen Faktor μ, die relative Permeabilität. Diese ist für Luft sowie für paramagnetische Stoffe nur sehr wenig größer als Eins, während sie für ferromagnetische Werkstoffe sehr stark von der Feldstärke abhängt und Werte von der Größenordnung 10^3 bis 10^4 annehmen kann. Sie ist ein Maß für die Erhöhung der Zahl der magnetischen Feldlinien in einem Material infolge Ausrichtung gewisser Elementarmagnete (im Eisen sind dies die Weißschen Bezirke). Wenn man daher in das Innere einer Spule einen Vollzylinder aus Weicheisen einschiebt – oder den Kupferdraht von vornherein auf diesen Eisenzylinder wickelt – und jetzt einen Strom durch die Wicklungen fließen läßt, so wird der Eisenzylinder für die Dauer des Stromflusses zu einem kräftigen Magneten: Unter der magnetischen Wirkung des Stromes werden bereits bei verhältnismäßig kleinen Stromstärken sehr viele Weißsche Bezirke im Eisenstab ausgerichtet. Wir haben jetzt einen Elektromagneten mit Eisenkern vor uns (Abb. 6). Da im Eisenkern die magnetische Induktion um das μ-fache größer ist als das von der Spule erzeugte Feld, und die magnetischen Induktionslinien alle in sich geschlossen sind, muß die magnetische Induktion außerhalb des Eisenkerns unmittelbar vor seinen Endflächen (Polflächen) denselben Wert wie im Eisenkern besitzen. Da aber die Permeabilität der Luft den Wert $\mu = 1$ hat, ist gemäß der Beziehung $\vec{B} = \mu\,\vec{H}$ auch die magnetische Feldstärke an diesen Stellen sehr groß. Durch Erhöhung der Stromstärke und damit des Magnetfeldes der Spule werden immer mehr Weißsche Bezirke im Eisenkern ausgerichtet, bis es schließlich alle sind (Abb. 2): Es liegt dann magnetische Sättigung vor, bei der die relative Permeabilität des Eisens auf den Wert Eins abgefallen ist und daher das von der Spule erzeugte Magnetfeld und die magnetische Induktion im Eisenkern gleich sind. Die im Sättigungsfall erreichten Feldstärken liegen ungefähr bei 30 kOe.

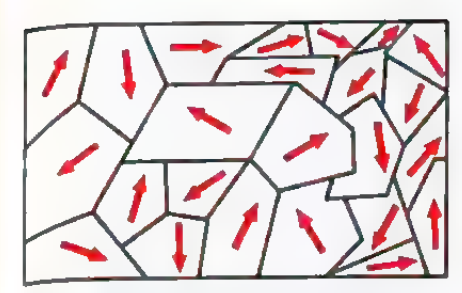


Abb. 1 Weißsche Bezirke eines polykristallinen Materials, die sich wie kleine Magnete verhalten; die Pfeile geben ihre Feldrichtung an

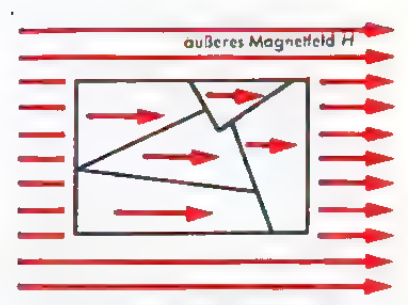


Abb. 2 Ferromagnetische Sättigung: Alle Weißschen Bezirke sind parallel zum äußeren Magnetfeld ausgerichtet

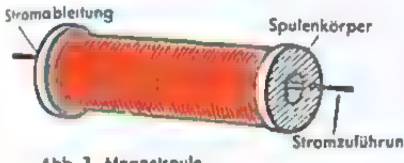


Abb. 3 Magnetspule



Abb. 4 Feld eines Kreisstromes

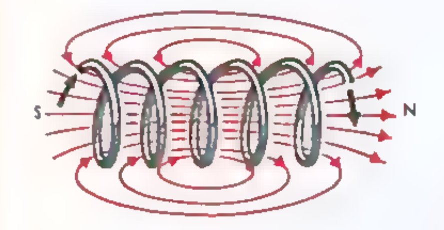


Abb. 5 Magnetische Feldlinien (Kraftlinien) in einer vom Strom durchflossenen Magnetspule

Eisenzylinder
Batterie

Abb. 6 Elektromagnet mit Eisenkern

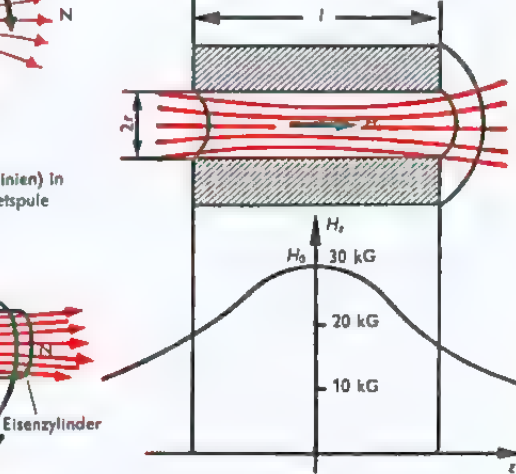


Abb. 7 Feldverlauf in einer Spule

ELEKTRONENRÖHRE

Die im Käfig des metallischen Kristallgitters gefangenen, quasifreien Elektronen (vgl. S. 300) lassen sich durch Energiezufuhr aus ihrem Behältnis befreien. Am einfachsten kann dies durch Erhitzen, z. B. Glühen des Metalls erfolgen. Im einzelnen kann man sich dabei den Austritt der Elektronen aus dem Metall am besten als eine Art Verdampfungsvorgang vorstellen (Abb. 1). Durch thermische, d. h. durch die Wärmebewegung der Metallatome bedingte Zusammenstöße der Atome des erhitzten Metalls werden energiereiche Elektronen freigemacht, deren Energie ausreicht, die Metalloberfläche zu durchdringen und gegen die Anziehungskräfte der im Metall zurückbleibenden positiven Ionen anzulaufen. Diesen glühelektrischen Emissionsvorgang läßt man zweckmäßigerweise im Vakuum vor sich gehen, um einmal eine Oxydation der hochtemperierten Metalloberfläche zu verhindern und zum anderen den Elektronen einen ungehinderten Austritt zu ermöglichen, d. h. Zusammenstöße mit bzw. Neutralisation durch Gasmoleküle und -ionen der Luft zu vermeiden. Eine Vorrichtung, die diese Bedingung erfüllt, ist die Elektronenröhre, die auf jeden Fall zwei Elektroden enthalten muß, aber auch noch zusätzlich Elektroden zur Beeinflussung des in ihr fließenden Stromes freier Elektronen erhalten kann. Die einfachste Form ist demnach die Röhrendiode (Abb. 2). Der mit dem negativen Pol einer Batterie verbundenen Glühkathode steht die positive Anode gegenüber, die Elektronen wegsaugt. Auf ihrem Wege von der Kathode zur Anode bilden sie während ihres Fluges eine negative Raumladung, die einer Beeinflussung durch die elektrischen Felder weiterer Elektroden (aber auch durch Magnetfelder) zugänglich ist. Die einfachste Elektronenröhre dieser Art ist eine solche mit einer dritten Elektrode, dem Steuergitter, das — wie schon der Name sagt — durch seinen gitterförmigen Aufbau für den Elektronenstrom durchlässig ist und ihn zu steuern gestattet, indem es die Raumladung beeinflußt. Im Schema ist die Schaltung einer solchen Röhrentriode in Abb. 3 wiedergegeben.

Aus der Abbildung 4 läßt sich im einzelnen die Einwirkung des Gitters auf die Raumladung näher erkennen. Schwankungen der Gitterspannung verdünnen oder verdichten die Raumladung und ändern so die Stromdichte des über die Anode abfließenden Elektronenstromes. Die in Abb. 4 gezeichnete Triode weist eine Konstruktionsbesonderheit der Kathode auf: Die Elektronen werden nicht von dem metallischen Heizdraht selbst, sondern von einer durch ihn (indirekt) erhitzten Oxidschicht (Bariumoxid) emittiert. Die Oxidkathode bietet zwei Vorteile: Erstens emittiert sie bereits bei relativ niedriger Temperatur (schwache Rotglut) Elektronen, so daß die Wärmeverluste geringer sind, und zweitens bildet sie eine Äquipotentialfläche, so daß alle Elektronen unter den gleichen Bedingungen zur Emission gelangen. Letzteres ist nämlich bei der Emission des Heizdrahtes selbst nicht der Fall, weil zwischen seinen Enden der Spannungsabfall der Heizspannung besteht. Über die Steuerungsverhältnisse einer Triode verschafft man sich durch Messung sogenannter Kennlinien einen Überblick. Zu diesem Zweck mißt man den über die Anode fließenden Anodenstrom I_a in Abhängigkeit von der Gitterspannung U_g (welche man am Gitter der Triode bei $\pm$ in Abb. 3 anlegt) bei jeweils konstant gehaltener Anodenspannung U_a. Für verschiedene Werte der Anodenspannung U_{a1}, U_{a2}, U_{a3} ergibt sich je eine Kennlinie (Abb. 5). Aus der Kennlinienschar lassen sich gewisse Kenngrößen (z. B. die Steilheit S) entnehmen, welche zur Beschreibung des Verhaltens der Röhre dienen. Bei negativen Gitterspannungen kann der Elektronenstrom bis zum Verschwinden gedrosselt werden; für hohe positive Werte der Gitterspannung muß er einen maximalen (Sättigungs-) Wert erreichen, wenn das Reservoir der Raumladung ausgeschöpft ist und alle emittierten Elektronen von der Kathode zur Anode gelangen.

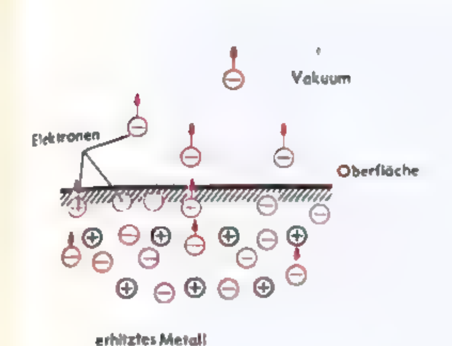


Abb. 1 Austritt von Elektronen aus erhitztem Metall

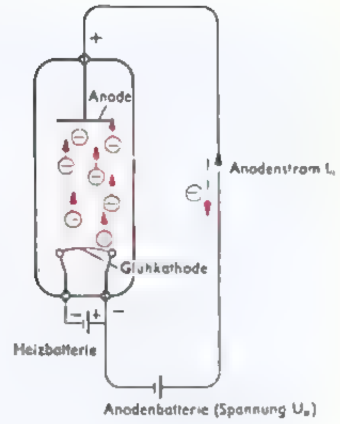


Abb. 2 Diode

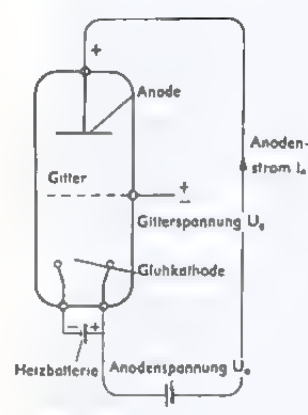


Abb. 3 Triode

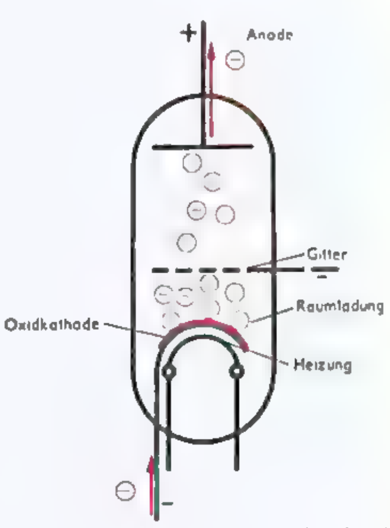


Abb. 4 Einwirkung des Gitters auf die Raumladung

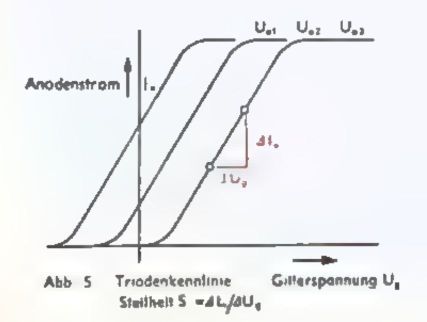


Abb. 5 Triodenkennlinie Gitterspannung U_g
Steilheit $S = \Delta I_a / \Delta U_g$

HALBLEITER

Im Gegensatz zu Metallen sind im Halbleiter nur wenig quasi-freie (s. S. 300) Elektronen bei Zimmertemperatur vorhanden. Die Leitfähigkeit der Halbleiter ist daher um etwa das 10^5-fache geringer als die der Metalle. Man kann sie erhöhen, indem man die elektronischen Doppelbindungen aufbricht, die in der Regel zwischen den vierwertigen Atomen der halbleitenden Substanzen (Germanium [Ge], Silicium [Si]) bestehen, wie aus dem ebenen Kristallgitterschema (Abb. 1 und 2) zu ersehen ist. Durch Einbau höher- oder geringerwertiger Fremdatome, die als Störstellen im Kristallgitter wirken (Abb. 4), lassen sich die Leitfähigkeiten der Halbleiter in weiten Grenzen verändern. Als Donator bezeichnet man dabei ein Fremdatom, das durch Abgabe eines Elektrons die Elektronenleitung ermöglicht, als Akzeptor einen „Elektronenfänger". Positive Leitung tritt bei Elektronenmangel ein – es wandert ein positiver Ladungszustand (Löcherleitfähigkeit); negative Leitung wird durch Elektronenüberschuß verursacht. Stoßen positiv und negativ leitende Gebiete zusammen, so tritt an der Grenzschicht ein Verarmungsbereich, d. h. eine Schicht hohen Widerstandes (Sperrschicht) auf (Abb. 6). Das Anlegen einer Spannung vergrößert (Sperrichtung) oder verkleinert (Flußrichtung) den Verarmungsbereich. Abb. 3 und Abb. 5 stellen die Verhältnisse im sog. Elektronen-Bändermodell dar. Der Bereich ΔE wird dort „verbotene Zone" genannt. Als Ordinate finden wir die Elektronenenergie E, als Abszisse die Längsausdehnung x aufgetragen. Halbleiterbauelemente, die einen Übergang von positiver zu negativer Leitung enthalten, bezeichnet man als *Halbleiterdioden*, solche, die zwei Übergänge der beschriebenen Art besitzen, als *Transistoren*. Der Transistor (Abb. 7) ist eine Halbleitertriode. Seine drei Elektroden bezeichnet man als Emitter, Basis und Kollektor. Wesentlich für seine Funktionsweise ist eine schmale Basis (50 μm), damit die Ladungsträger aus dem Emitterraum durch die Grenzschicht 1 und durch den Basisraum hindurchwandern und somit die Vorgänge an der Grenzschicht 2 beeinflussen können; dadurch erfolgt eine Steuerung des Stromverlaufes zwischen Basis und Kollektor. Dies ermöglicht die Verwendung des Transistors zur Verstärkung und Erzeugung von Schwingungen. Er verdrängt mehr und mehr die Glühelektronenröhren (s. S. 310). Neben dem geringeren Raumbedarf wirkt sich der Fortfall der Heizleistungen vorteilhaft aus.

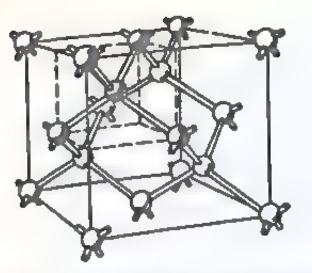


Abb. 1 Kristallstruktur einer halbleitenden Substanz

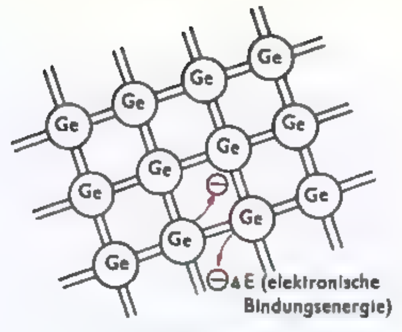


Abb. 2 Kristallgitterschema

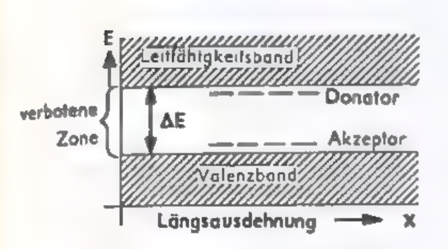


Abb. 3 Elektronen-Bändermodell eines Halbleiters mit Störleitung

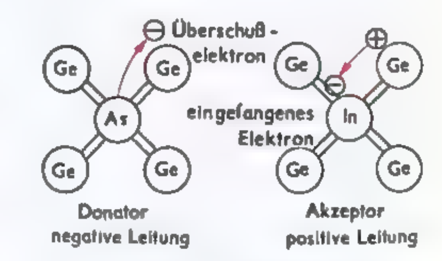


Abb. 4 Donator- und Akzeptorstörstelle

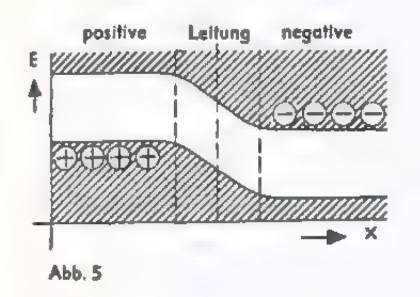
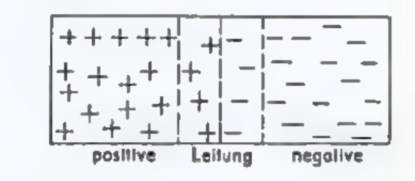
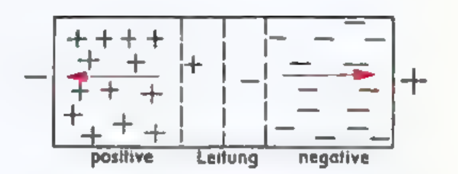


Abb. 5





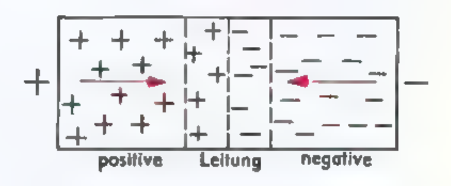


Abb. 6 Entstehung und Schwankung eines Verarmungsbereiches

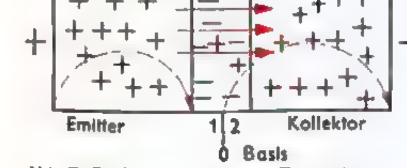


Abb. 7 Funktionsweise eines Transistors: Strom im Kollektorkreis gesteuert durch Leitung im Emitterkreis

RELAIS

Ein Relais ist eine elektrische Schaltvorrichtung mit einem oder einer Vielzahl von Kontakten, welche Arbeitsstromkreise öffnen oder schließen. Die Betätigung der Schaltvorrichtung geschieht in der Regel durch einen Elektromagneten, der mittels eines beweglichen Ankers, welchen er anzieht oder losläßt, die Kontakte schließt oder öffnet. Es gibt jedoch auch Relais, die sich zur Betätigung der Schaltvorrichtung anderer Kräfte bedienen, z. B. elektrischer Anziehungskräfte oder mechanischer, etwa der Biegungskräfte eines Bimetallstreifens beim Thermorelais.
An dieser Stelle soll auf das elektromagnetische Relais näher eingegangen werden, das in der Fernmeldetechnik eine wichtige Rolle spielt.
In den Abbildungen 1–3 sind drei unterschiedlich konstruierte Arten elektromagnetischer Relais dargestellt, die sich durch die Gestaltung des elektrischen Ankers unterscheiden. Alle drei bestehen aus einer Relaisspule mit einem Eisenkern und einem eisernen Joch (bzw. einem dazu ausgebildeten langen Anker; Abb. 3), das den beweglichen Anker trägt und die magnetische Polarität des rückwärtigen Teiles des Eisenkernes dem Anker vermittelt, so daß zwischen Anker und Vorderseite des Kernes die Anziehungskraft verschiedener magnetischer Polarität wirkt. Um zu vermeiden, daß infolge remanenten (d. h. auch nach Wegfall des erregenden Stromflusses durch die Spule bestehenbleibenden) Magnetismus der Anker am Eisenkern haften bleibt, bewirkt ein Trennstift aus unmagnetischem Material (Messing) einen schmalen Luftspalt zwischen Anker und Elektromagneten, so daß ein Abfallen des Ankers beim Wegfall des Spulenstromes gewährleistet ist. Die Zuführung des Spulenstromes geschieht über die als „Lötstifte" bezeichneten Kontakte. Beim Relais nach Abb. 1 ist im Ruhezustand der über die Kontakte 1 und 2 führende Arbeitskreis unterbrochen. Wird der Anker angezogen, drückt er den unteren Federkontakt gegen den oberen und schließt den Arbeitskreis. Wie aus den Abb. 2 und 3 hervorgeht, lassen sich auch mehrere Kontaktsätze auf einem Relais anbringen; sie werden dann beim Anziehen des Ankers gleichzeitig betätigt. Hierbei sind auch Kontaktstellungen mit sog. Ruhestrombetrieb angegeben, d. h., der Stromkreis ist im Ruhezustand des Relais geschlossen und wird beim Anziehen des Ankers unterbrochen (Abb. 2 und 3; Arbeitskreiskontakte 2 und 3). Ein elektromagnetisches Relais, das bevorzugt in der Telegraphie Verwendung findet und mit einem beweglichen Anker Stromimpulse verschiedener Richtung zu schalten gestattet, ist das gepolte (polarisierte) Relais (Abb. 4). Durch einen permanenten Magneten erhält der an einem Torsionsdraht aufgehängte, die Kontakte an seinem vorderen Ende tragende Anker die Polarität eines magnetischen Nordpols. Sein hinteres Ende ragt in den Luftspalt eines eisernen Joches mit südpolarem Magnetismus. Das Joch trägt außerdem die Relaisspule, welche den steuernden magnetischen Fluß erzeugt. Im einzelnen ist die Überlagerung der magnetischen Flüsse und damit auch der Kräfte aus der Abb. 4 genauer zu entnehmen.

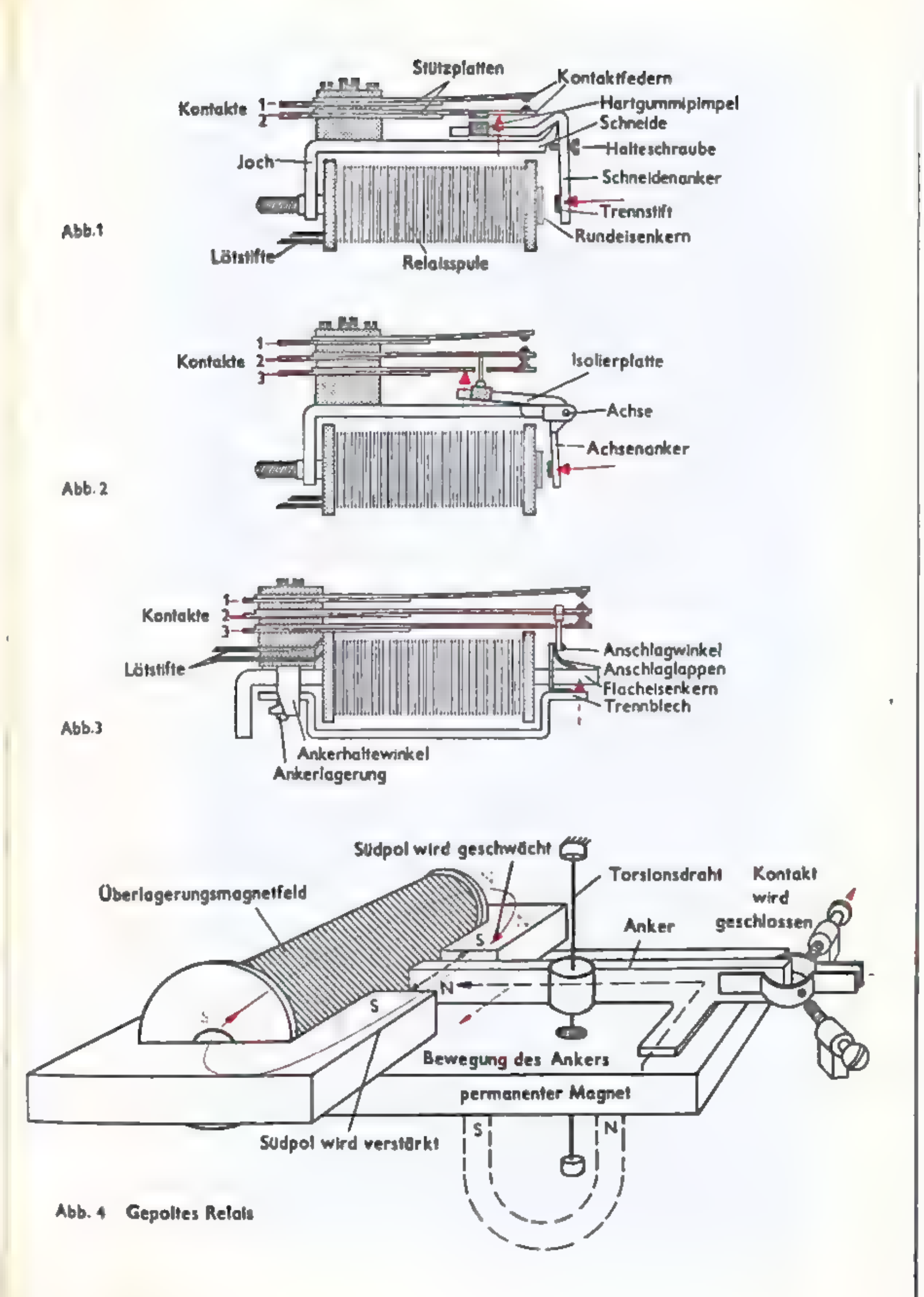


Abb. 4 Gepoltes Relais

SCHALTER

Schalter dienen dem Ein- und Ausschalten elektrischer Stromkreise durch Schließen und Öffnen der metallischen Verbindung. In Abb. 1 ist ein Schalter für Schwachstrom gezeichnet, wie er z.B. für Klingelleitungen Verwendung findet und in ähnlicher Gestalt auch in der Fernmeldetechnik zur An- und Abschaltung von Apparaten benützt wird. Der Schalthebel ist mit dem Kontakt *K* leitend verbunden und erlaubt in den Stellungen I und II die wahlweise Anschaltung zweier Leitungen. Beim Schalten stärkerer Ströme und höherer Spannungen würden sich bei Benutzung eines Schalters nach Abb. 1 zu starke Funken bilden, die in Lichtbögen mit zerstörender Gewalt ausarten könnten. Um deren Entstehung zu verhindern, muß der Unterbrechungsvorgang möglichst rasch erfolgen. Man verwendet daher Hebelschalter, wie ein solcher in Abb. 2 dargestellt ist. Das Schaltmesser ist über eine Abreißfeder mit dem Hebel verbunden. Beim Herausziehen des Schalthebels spannt sich die Feder und reißt dann rasch das Schaltmesser aus dem Kontakt, der kurze Abreißfunken kann sich nicht zum Lichtbogen ausbilden. Eine andere Möglichkeit der Vermeidung störender Funkenbildung bietet der Quecksilberschalter, der mit einem Schutzgas (Edelgas, Stickstoff) gefüllt ist (Abb. 3). Die für Schaltung von Beleuchtungskörpern im Haushalt Verwendung findenden Schaltertypen sind der Dreh-, Kipp- und Druckknopfschalter (Abb. 4–6). Bei sämtlichen drei Schaltern erfolgt die Ausschaltung durch eine Federbetätigung ruckartig, wodurch die Stromunterbrechung ohne schädliche Funkenbildung erfolgt. Die Schaltung sehr starker Ströme nimmt man durch elektromagnetische Schalter vor (Abb. 7). Elektrische Leitungen hoher Spannung schaltet man unter Öl (Abb. 8); das in diesen Hochleistungsschaltern die Kontakte umgebende Öl dient einerseits der Isolation und löscht andererseits den entstehenden Ausschaltlichtbogen. Die Schaltung von Höchstspannungen erfolgt meist mit Druckgasschaltern (Abb. 9), bei denen die sich bildenden Lichtbögen kräftig mit Druckluft (bis über 30 atü) beblasen und gelöscht werden.

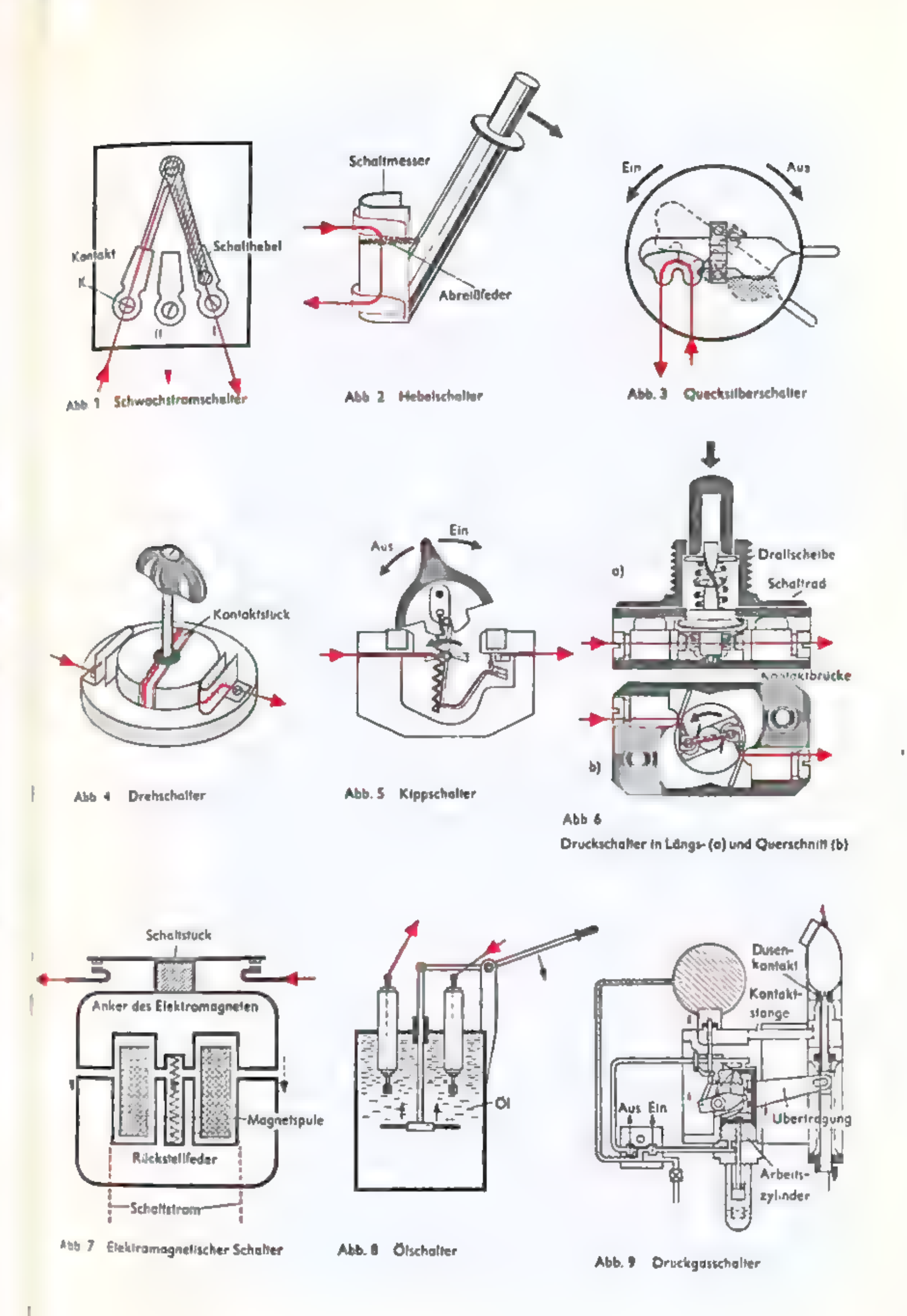


Abb. 1 Schwachstromschalter

Abb. 2 Hebelschalter

Abb. 3 Quecksilberschalter

Abb. 4 Drehschalter

Abb. 5 Kippschalter

Abb. 6 Druckschalter in Längs- (a) und Querschnitt (b)

Abb. 7 Elektromagnetischer Schalter

Abb. 8 Ölschalter

Abb. 9 Druckgasschalter

TRANSFORMATOR

Transformatoren (Wandler, Umspanner) dienen einerseits zur Transformierung von Wechsel- bzw. Drehstrom auf hohe Spannungen, um bei der Fortleitung über große Entfernungen die relativen Spannungsverluste niedrig zu halten, andererseits der Herabsetzung der Spannung an den Orten des Verbrauchs.
Die physikalische Grundlage der Funktionsweise der Transformatoren ergibt sich aus dem Faradayschen Induktionsgesetz, das aussagt, daß bei Änderung des magnetischen Flusses durch eine Leiterschleife in dieser eine der Änderungsgeschwindigkeit proportionale Elektrizitätsströmung entsteht (Induktionsstrom, Induktionsspannung). Erzeugt man die magnetische Flußänderung mittels eines durch Wechselstrom erregten Elektromagneten (Primärspule des Transformators), so läßt sich in einer zweiten vom magnetischen Wechselfeld durchfluteten Spule wieder elektrische Energie gewinnen (Sekundärspule des Transformators). Die Umwandlung geschieht mit sehr hohem Wirkungsgrad (98—99%), da als einziger Energieverlust bei niederfrequentem Wechselstrom nur die Erwärmung des den magnetischen Fluß aufnehmenden Eisenkernes durch Wirbelströme auftritt. Durch Lamellierung des Eisenkernes läßt sich aber auch dieser Energieverlust wirksam herabsetzen. Im Idealfalle gilt:
$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$ (Eingangsspannung × Eingangsstrom = Ausgangsspannung × Ausgangsstrom). Das Verhältnis $U_1 : U_2$ hängt dabei nur von dem Windungszahlenverhältnis der induktiv über einen Eisenkern gekoppelten Spulen ab (Abb. 1).
Zum Heraufsetzen der Spannung besitzt die Sekundärwicklung des Transformators mehr Windungen als die Primärwicklung. In der Nähe des Verbrauchers wird die ankommende hohe Spannung im Transformatorhaus auf eine niedrige Spannung transformiert. Die hierzu verwendeten Transformatoren besitzen eine Primärwicklung mit hoher, dagegen eine Sekundärwicklung mit niedriger Windungszahl. So wird in der Regel im Verteilungsnetz der Städte die Spannung auf 6 000 Volt heruntertransformiert und dann durch bezirksweise aufgestellte Transformatoren, unter Umständen auch durch Einzeltransformatoren in jedem Haus, auf die Spannungsnorm von 220 Volt gebracht. Auch die verschiedenen Klingelanlagen beziehen ihre elektrische Energie aus diesem normierten Netz, und zwar über einen Klingeltransformator (in Sparschaltung; s. unten), der in der Regel eine Betriebsspannung von 4—8 Volt liefert. Eine Ausführungsform des Transformators mit geschlossenen Eisenjochen für Wechselstrom zeigt Abb. 2. In Abb. 3a u. 3b ist ein Transformator in Sparschaltung wiedergegeben. Bei dieser Bauart sind die beiden Wicklungen galvanisch nicht getrennt. Ein Transformator dieser Art besitzt nur eine einzige Wicklung, die an einer Stelle angezapft ist. Wegen der Einsparung der selbständigen Sekundärwicklung und eines Teiles der Stromwärmeverluste nennt man ihn Spartransformator. Die Zündspule der Zündanlage eines Kraftfahrzeuges arbeitet nach diesem Prinzip. Da dort eine niedrige Spannung in die hohe Zündspannung umgewandelt werden muß, wird die Zündspannung an der Gesamtlänge der Wicklung entnommen, die niedrige Spannung jedoch an die angezapfte Wicklung gelegt.

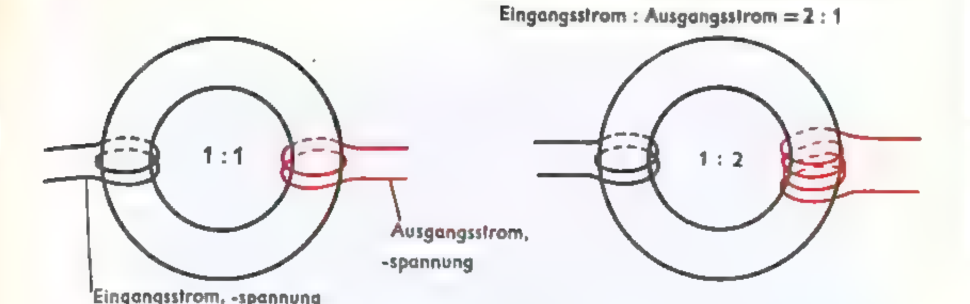
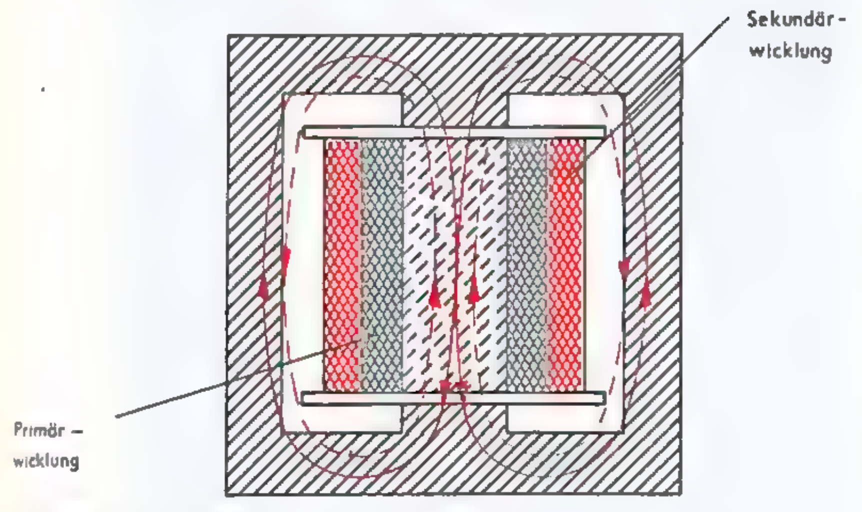


Abb. 1 Ringkerntransformator



Magnetisches Wechselfeld verbleibt weitgehend im Eisen und bewirkt elektrische Induktion in der Sekundärwicklung

Abb. 2 Kerntransformator

Sekundärspule als Teil der Primärspule

Abb. 3a Spartransformator

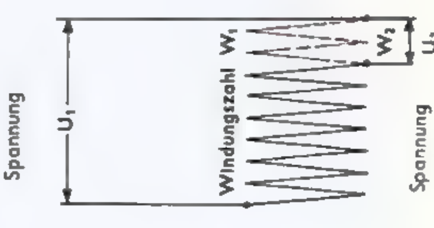


Abb. 3 b Prinzipschaltbild eines Spartransformators

ELEKTRONISCHE GRUNDSCHALTUNGEN

In der Abb. 1 ist die häufigste Schaltung einer Verstärkerröhre gezeigt (s. S. 310). Die am Gitter liegende Eingangswechselspannung bewirkt, daß der durch die Röhre fließende Anodenstrom J im gleichen Rhythmus vergrößert und verkleinert wird. J fließt durch den Anodenwiderstand R_a und den Kathodenwiderstand R_k und ruft in beiden einen Spannungsabfall hervor. Je größer R_a ist, um so größer wird auch die Ausgangswechselspannung. R_k (und damit der Spannungsabfall an R_k) wird nur so groß gewählt, daß das Gitter stets negativ gegenüber der Kathode bleibt. Die durch die Änderungen von J an R_k auftretende Wechselspannung ist oft unerwünscht, weil sie die Eingangsspannung zum Teil kompensiert. Es erleichtert das Verständnis, wenn man die in Abb. 1 und 2 rot bzw. schwarz eingezeichneten Momentanwerte von Spannungen und Strom an Hand des Ohmschen Gesetzes nachrechnet.

Beim Kathodenverstärker (Abb. 2) wird das „Mitlaufen" der Kathode mit der Gitterwechselspannung ausgenutzt: Die Ausgangsspannung wird an R_k abgegriffen und da die Kathodenwechselspannung die Gitterwechselspannung nicht völlig kompensieren darf, ist die Verstärkung sogar kleiner als Eins. Der Kathodenverstärker hat einen sehr kleinen Ausgangswiderstand, das heißt also, daß ein im Ausgangskreis fließender Strom die Spannung nur sehr wenig verfälscht.

Koppelt man bei einem Verstärker einen festen Bruchteil der Ausgangsspannung so auf den Eingang zurück, daß die Eingangsspannung zu einem Teil kompensiert wird, so bewirkt diese sogenannte Gegenkopplung (s. Abb. 3) zunächst nur eine Verkleinerung des Verstärkungsfaktors. Nun treten aber in jedem Verstärker Abweichungen von der exakten Proportionalität zwischen Ein- und Ausgangsspannung (Linearität) auf. Der Verstärker verhält sich, als ob zu seiner Ausgangsspannung eine Fehlerspannung addiert sei. Die Gegenkopplung addiert einen Teil der Fehlerspannung zur Eingangsspannung hinzu, so daß am Ausgang des Verstärkers eine Korrekturspannung entsteht. Der Restfehler der Ausgangsspannung wird soweit verkleinert, daß er gerade genügt, um die Korrekturspannung zu erzeugen.

Wo sehr genaue konstante Gleichspannung benötigt wird, benutzt man eine Stabilisierungsschaltung nach Abb. 4. Als Spannungsnormal dient z. B. eine Glimmlampe, deren Spannungsabfall nur sehr wenig vom hindurch fließenden Strom abhängt. Ein fester Bruchteil der zu stabilisierenden Spannung wird mit der Glimmlampenspannung verglichen und die Differenz an den Eingang eines Verstärkers gegeben. Die Ausgangsspannung des Differenzverstärkers steuert das Gitter einer Röhre, die den Strom im Spannungsteiler bestimmt und dadurch die Spannung U_2 auch bei Belastungsschwankungen bis auf einen Restfehler konstant hält.

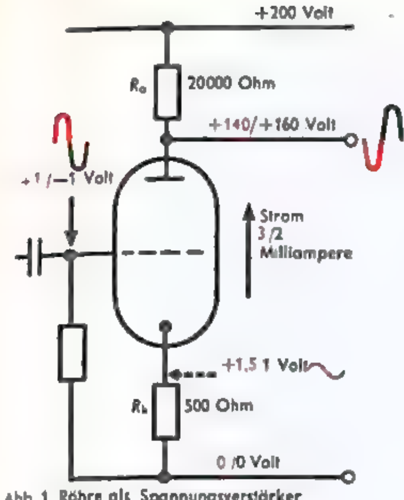


Abb. 1 Röhre als Spannungsverstärker

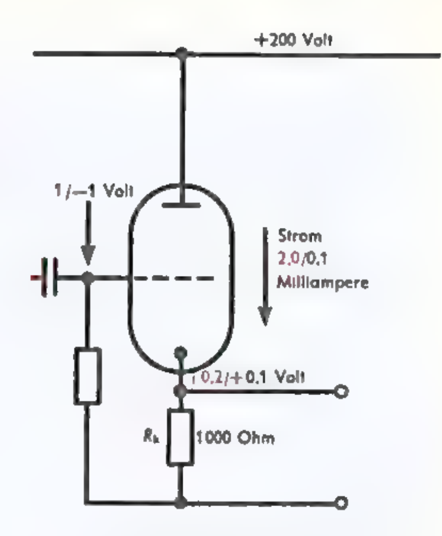


Abb. 2 Röhre als Kathodenverstärker

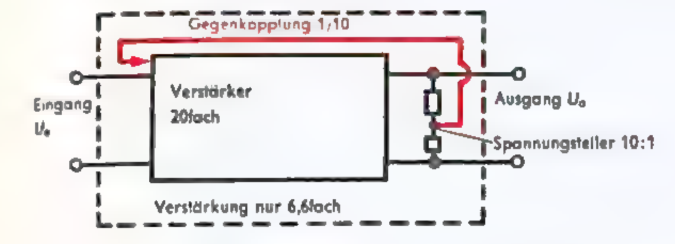




Abb. 3 Wirkungsweise einer Gegenkopplung zur Verbesserung der Linearität eines Verstärkers

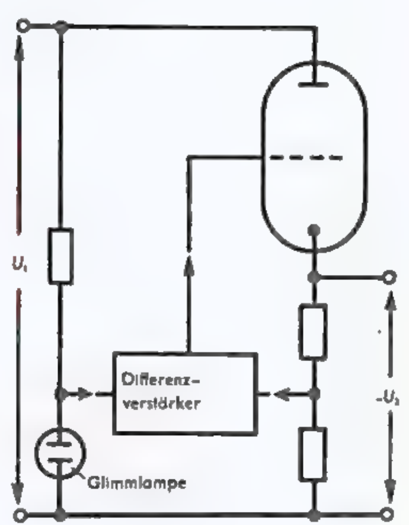


Abb. 4 Erzeugung einer konstanten Spannung U_2 aus einer schwankenden Spannung U_1
U_2 ist auch gegenüber schwankender Belastung stabil

RUNDFUNKEMPFÄNGER

Der einfachste Rundfunkempfänger besteht aus dem Eingangskreis zur Abstimmung auf die zu empfangenden Frequenzen der verschiedenen Sender, dem Demodulationskreis zum Aussondern der tonfrequenten Schwingungen aus dem hochfrequenten Träger (Audionschaltung), einer Niederfrequenzverstärkerstufe und dem Lautsprecher. Zur Versorgung der Verstärkerelemente (Hochvakuumröhren oder Transistoren) ist ein Netzgerät vorhanden, das die erforderlichen Versorgungsspannungen liefert. Entsprechend den Frequenzbändern, auf denen Sender Wellen abstrahlen, sind die Empfänger mit dem Langwellenbereich (150 bis 285 kHz), dem Mittelwellenbereich (bis 1605 kHz), dem Kurzwellenbereich (6 bis 21,4 MHz) und dem Ultrakurzwellenbereich (bis 100 MHz) ausgerüstet. Lang-, Mittel- und Kurzwellenbereich arbeiten mit einem Kanalabstand von 9 kHz und mit Amplitudenmodulation (s. S. 304); der Kanalabstand im UKW-Bereich beträgt 300 kHz, dort wird mit Frequenzmodulation gearbeitet (s. S. 304). Der Empfang ist hier in der Regel besser als in den anderen Bereichen, da auch hohe Tonfrequenzen, die das Klangbild stark beeinflussen, mit übertragen werden können. Auch atmosphärische Störungen, die amplitudenmodulierenden Charakter haben, treten hier kaum in Erscheinung.

Die Ausbreitungsverhältnisse der vier Funkbereiche bestimmen ihren Verwendungszweck und ihre Einsatzmöglichkeiten. Lang- und Mittelwellensender strahlen eine Bodenwelle entlang der Erdoberfläche und eine Raumwelle aus. Im allgemeinen empfängt man nur die Bodenwelle (Reichweite bis zu einigen hundert km); die an der Heavysideschicht (elektrisch leitende Schicht in der Atmosphäre) reflektierte Raumwelle erlaubt weit größere Reichweiten. Im Kurzwellenbereich wird nur mit Raumwellen gearbeitet. Ultrakurzwellen breiten sich quasioptisch (geradlinig) aus; sie erzielen deshalb nur verhältnismäßig geringe Reichweiten (Aufstellung der Sender auf Anhöhen!).

Je mehr hintereinandergeschaltete Abstimmkreise im Empfänger vorhanden sind, desto größer ist seine Trennschärfe. Um bei den vielen notwendigen Kreisen die Handabstimmung zu sparen, wurde der Superheterodynempfänger („Super") entwickelt (Abb. 1). In einem Gerät dieser Bauart wird im Oszillator eine eigene Hochfrequenzschwingung erzeugt und mit der empfangenen gemischt. Beide Kreise werden mit einem auf einer gemeinsamen Achse laufenden Drehkondensator abgestimmt, und zwar in der Form, daß die Differenz der beiden Frequenzen immer gleich ist. Alle folgenden Kreise (Zwischenfrequenzfilter) sind nur einmal beim Hersteller auf diese Differenzfrequenz eingestellt worden. Man erreicht so eine hohe Selektivität, braucht aber nur zwei Kreise abzustimmen. Wegen der wesentlich höheren Trägerfrequenz des UKW-Bereiches werden dort kleine Abstimmkreise benötigt, die im Empfänger als Sonderbauteile in Erscheinung treten. Die Drehkondensatoren sind jedoch im allgemeinen auf der gleichen Welle befestigt wie die für den Mittelwellenbereich (vgl. Abb. 2).

Der Niederfrequenz- oder Tonfrequenzteil des Empfängers ist im allgemeinen in mehrere Kanäle für Hochton und Tiefton getrennt. Auch werden besondere Lautsprecher für hohe und tiefe Töne verwendet. Neben den hier beschriebenen Geräten gibt es natürlich eine ganze Reihe von Spezialgeräten, die jeweils (z. B. Autoradio) auf ihren besonderen Verwendungszweck hin konstruiert werden müssen.

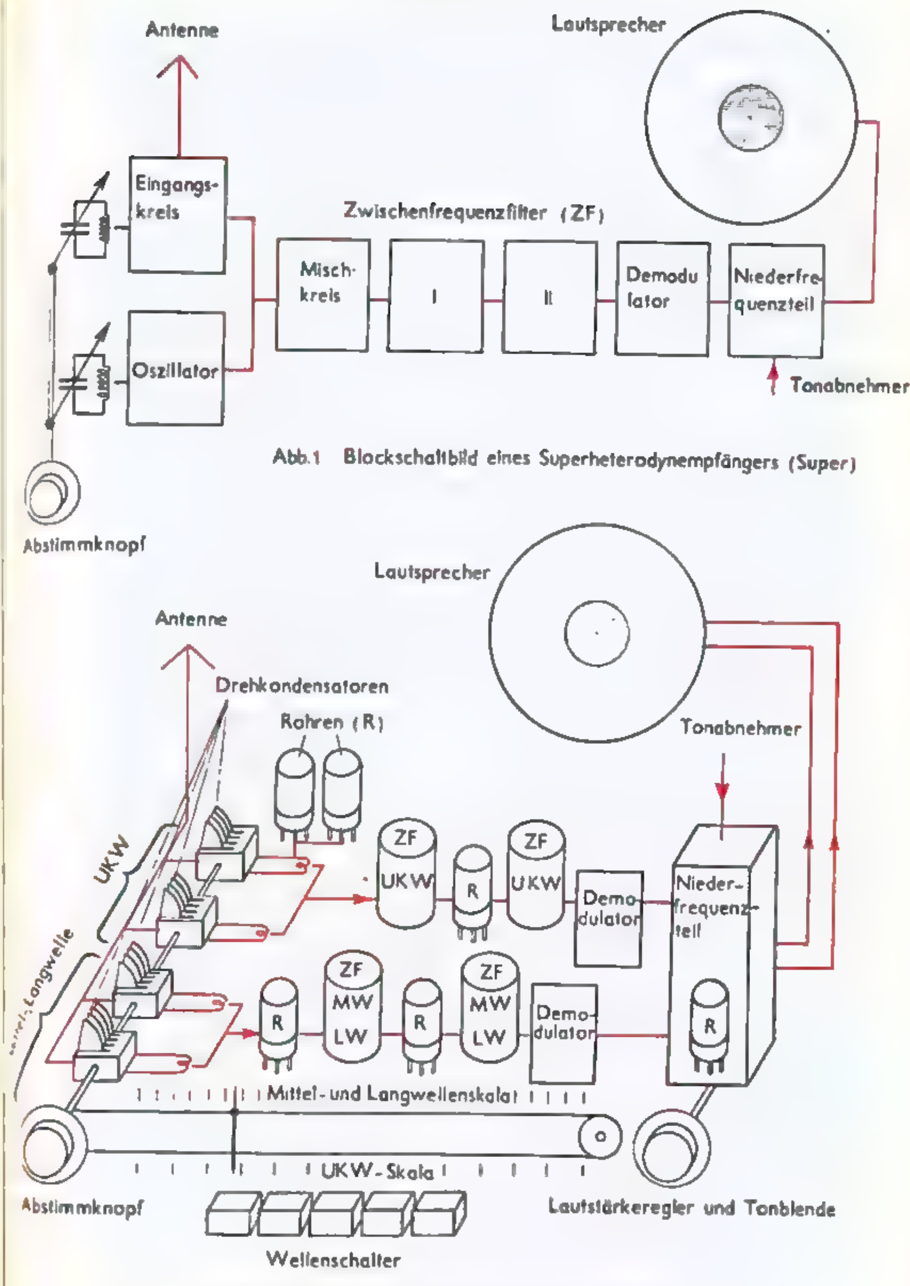


Abb. 1 Blockschaltbild eines Superheterodynempfängers (Super)

Abb. 2 Prinzipieller Aufbau eines Rundfunkempfangsgerätes

LAUTSPRECHER

Der Lautsprecher dient der Umformung elektrischer Energieschwankungen in Schwankungen akustischer Energie, d. h. in Schall. Er hat somit in größerem Maßstab dieselbe Aufgabe zu leisten wie in kleinem Maßstab der Telephonhörer. Die zuerst gebauten Lautsprecher besaßen daher die gleiche Konstruktion wie jene (Abb. 1), jedoch in einer kräftigeren Ausführung: Vor einem permanenten Magneten, dessen Feld durch Wicklungen, die vom Sprechstrom durchflossen werden, verstärkt und geschwächt wird, befindet sich eine Metallmembran, die im Rhythmus der Feldschwankungen schwingt und diese Schwingungen auf die Luft als Dichteschwankungen und damit als Schall überträgt. Um diese Übertragung zu verbessern, befand sich über der Membran ein kegelförmiger Schalltrichter. Durch die starre Einspannung der Membran wird jedoch die Frequenztreue der Wiedergabe ungünstig beeinflußt. Die Weiterentwicklung der Lautsprecher mußte deshalb darauf abzielen, der Membran ein möglichst freies Schwingen zu ermöglichen. Die erste Freischwingerkonstruktion zeigt Abb. 2: Als Membran dient ein elastisch aufgehängter Pappkonus, der durch einen vom Sprechstrom erregten Anker bewegt wird, der wiederum frei im Feld eines permanenten Magneten schwingt.

Einen weiteren Fortschritt stellen die dynamischen Lautsprecher dar (Abb. 3 und 4). Der frei in einem Magnetfeld schwingende „Anker" besteht bei ihnen aus einer mit der Membran verbundenen Schwingspule, die beim elektrodynamischen Lautsprecher (Abb. 3) in das Innere eines durch Gleichstrom erregten Elektromagneten taucht, während sie beim permanentdynamischen Lautsprecher im ringförmigen Hohlraumspalt eines permanenten Topfmagneten schwingt.

Die bisher beschriebenen Lautsprecher bedienen sich für die Umsetzung der Stromschwankungen in solche mechanischer Natur des elektrodynamischen Prinzips. Auf anderen Grundlagen beruhen der Kristallautsprecher (Abb. 5) und der elektrostatische Lautsprecher (Abb. 6). Der Kristallautsprecher bedient sich des piezoelektrischen Effektes, das heißt der Erscheinung, daß sich gewisse Kristalle (Quarz, Seignettesalz) unter Druck elektrisch aufladen und umgekehrt bei elektrischer Aufladung Änderungen ihrer Dicke zeigen. Bei Anlegen einer Wechselspannung treten entsprechende Variationen der Dicke auf. Diese Dickeschwingungen werden in der aus Abb. 5 gezeigten Weise auf die Membran übertragen. Der elektrostatische Lautsprecher benutzt die elektrostatischen Anziehungs- und Abstoßungskräfte, die eine Membran im Felde eines Kondensators erleidet, wenn ihre Spannung schwankt. Die Kondensatorplatten sind durchlöchert, so daß die erzeugten Dichteschwankungen der Luft die Vorrichtung als Schall verlassen können. Die beiden zuletzt beschriebenen Lautsprecher eignen sich besonders zur Wiedergabe der hohen Frequenzen. Sie dienen daher im sogenannten High-fidelity-Verfahren (Hi-Fi) in Kombination mit elektrodynamischen Lautsprechern der besonders naturgetreuen Wiedergabe.

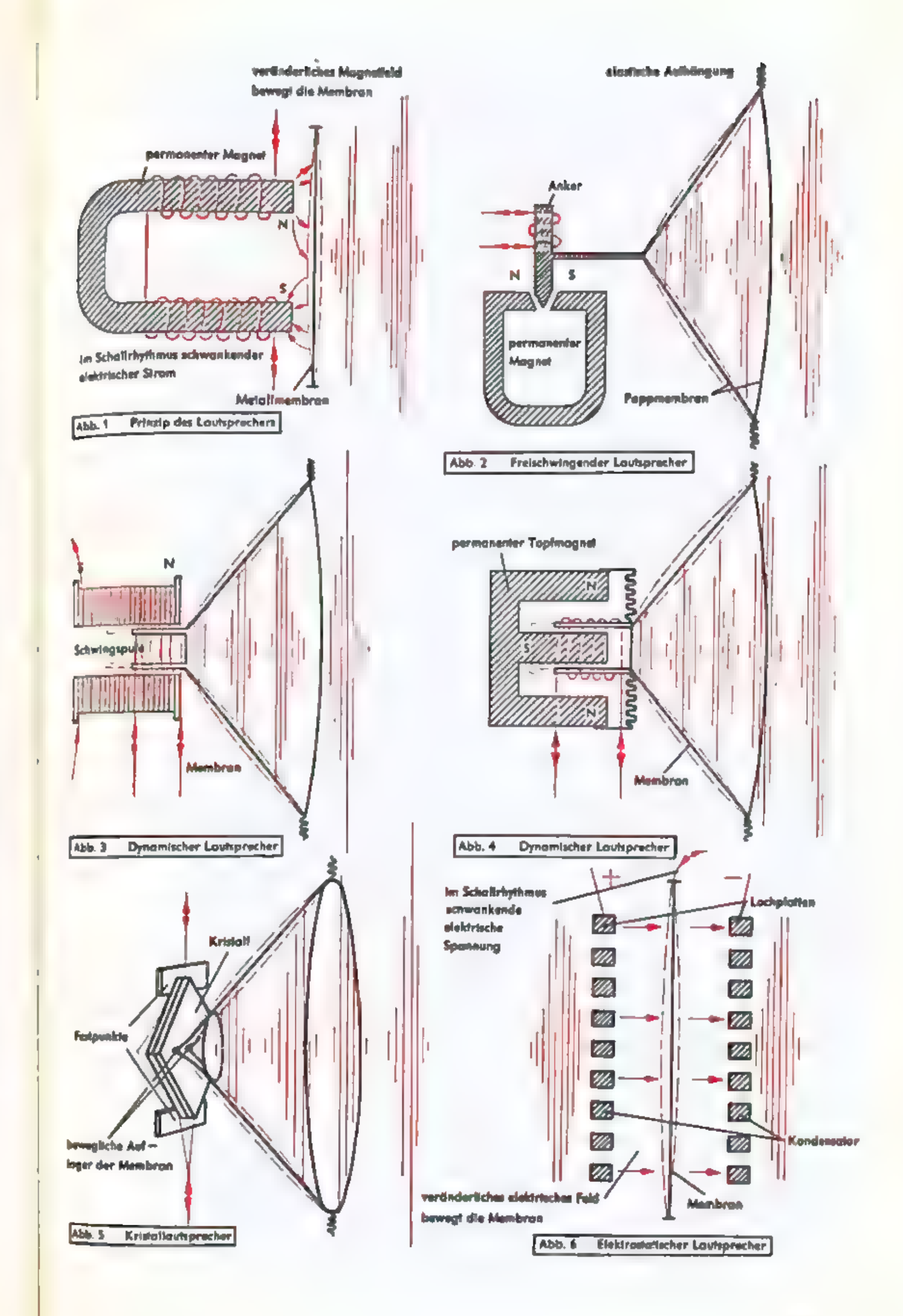


Abb. 1 Prinzip des Lautsprechers

Abb. 2 Freischwingender Lautsprecher

Abb. 3 Dynamischer Lautsprecher

Abb. 4 Dynamischer Lautsprecher

Abb. 5 Kristallautsprecher

Abb. 6 Elektrostatischer Lautsprecher

TRÄGERFREQUENZTECHNIK

Die hohen Kosten, die die Herstellung nachrichtentechnischer Übertragungswege verursacht — sei es auf drahtgebundenem oder drahtlosem Wege —, haben sehr bald das Problem ihrer Mehrfachausnutzung aufgeworfen. Man versteht darunter die Führung einer Vielzahl von Nachrichtenwegen, sogenannten Kanälen, gleichzeitig und unabhängig voneinander über *einen* Übertragungsweg. Dies ist natürlich nur möglich, wenn man die technischen Möglichkeiten der Trennung der Kanäle vor Eintritt und nach Austritt in den bzw. aus dem Übertragungsweg besitzt. In der Trägerfrequenztechnik ist dieses Trennungshilfsmittel die sogenannte *Trägerfrequenz*. Jedem Kanal entspricht ein anderer Frequenzbereich. Denn zur Übertragung z. B. von Sprache beim Fernsprechen benötigt man eine Bandbreite des Frequenzbereiches von 3400 Hz. Demgemäß wählt man die Frequenzen der Trägerwellen in Frequenzabständen von 4 kHz (= 4000 Hz), also etwa: 4 kHz, 8 kHz, 12 kHz, 16 kHz, 20 kHz, 24 kHz bei einem Übertragungssystem von 6 Kanälen. Bei diesem Frequenzabstand sorgt der Zwischenraum von 600 Hz zwischen zwei benachbarten Kanälen für die saubere Trennung der Übertragung und damit für die Unterdrückung des Nebensprechens, d. h. des unfreiwilligen Mithörens eines Gespräches auf dem benachbarten Kanal. Man spricht von einer Trägerfrequenz, weil sich das Sprachband dieser Frequenz überlagern läßt und die hohe Frequenz gleichsam die niedrigere Sprachfrequenz trägt, indem die Trägeramplitude im Takt der Sprachfrequenz moduliert wird (Abb. 1). Am einfachsten Beispiel einer trägerfrequenten Übertragung von zwei Kanälen soll im Prinzip die Mehrfachausnutzung eines Übertragungsweges nach dieser Technik erläutert werden (Abb. 2). Das durch ein Mikrophon erzeugte Sprachband in Kanal 1 wird mittels eines Modulators dem Träger 1 aufmoduliert und dem Übertragungsweg zugeführt (Abb. 2, schwarz). Entsprechendes gilt für den Kanal 2 mit dem Träger 2, dessen Frequenz höher als die des Trägers 1 ist (Abb. 2, rot). Über den Übertragungsweg gelangt das modulierte Frequenzgemisch an den Empfangsort. Dort lassen geeignete Filter jeweils die Frequenzen des Kanals 1 bzw. des Kanals 2 durch. Nach der Entmischung werden die modulierten Trägerfrequenzen in einem Demodulator wieder von dem Sprachband befreit und die Sprachfrequenzen akustisch wahrnehmbar gemacht (Telephon, Lautsprecher).

Die Entwicklung der Trägerfrequenzsysteme ist bedingt durch die höchsten Frequenzen, die die jeweils entwickelten Übertragungswege zulassen. Sie tragen Typenbezeichnungen, die aus einem Buchstaben (Z oder V) und der Kanalzahl zusammengesetzt sind (bisweilen auch noch nachfolgende Buchstaben, die auf spezielle Verwendungszwecke hinweisen). Z bedeutet „Zweidraht"-, V „Vierdraht"-Übertragung. Im ersten Falle erfolgen Sprechen und Gegensprechen auf einunddemselben Kanal, im zweiten auf verschiedenen Kanälen. Es bedeuten also: Z-6-System, ein 6-Kanal-Zweidraht-System, ein V-2700-System, ein 2700-Kanal-Vierdraht-System. Dabei eignet sich das Z-6-System zur Mehrfachausnutzung normaler NF-Kabel, während ein V-2700-System schon der hohen Trägerfrequenz wegen ein Koaxialkabel zur Übertragung benötigt. Dazwischen liegen Systeme wie das V-960, das ebenfalls auf Koaxial-(Tuben-)Kabeln eingesetzt wird.

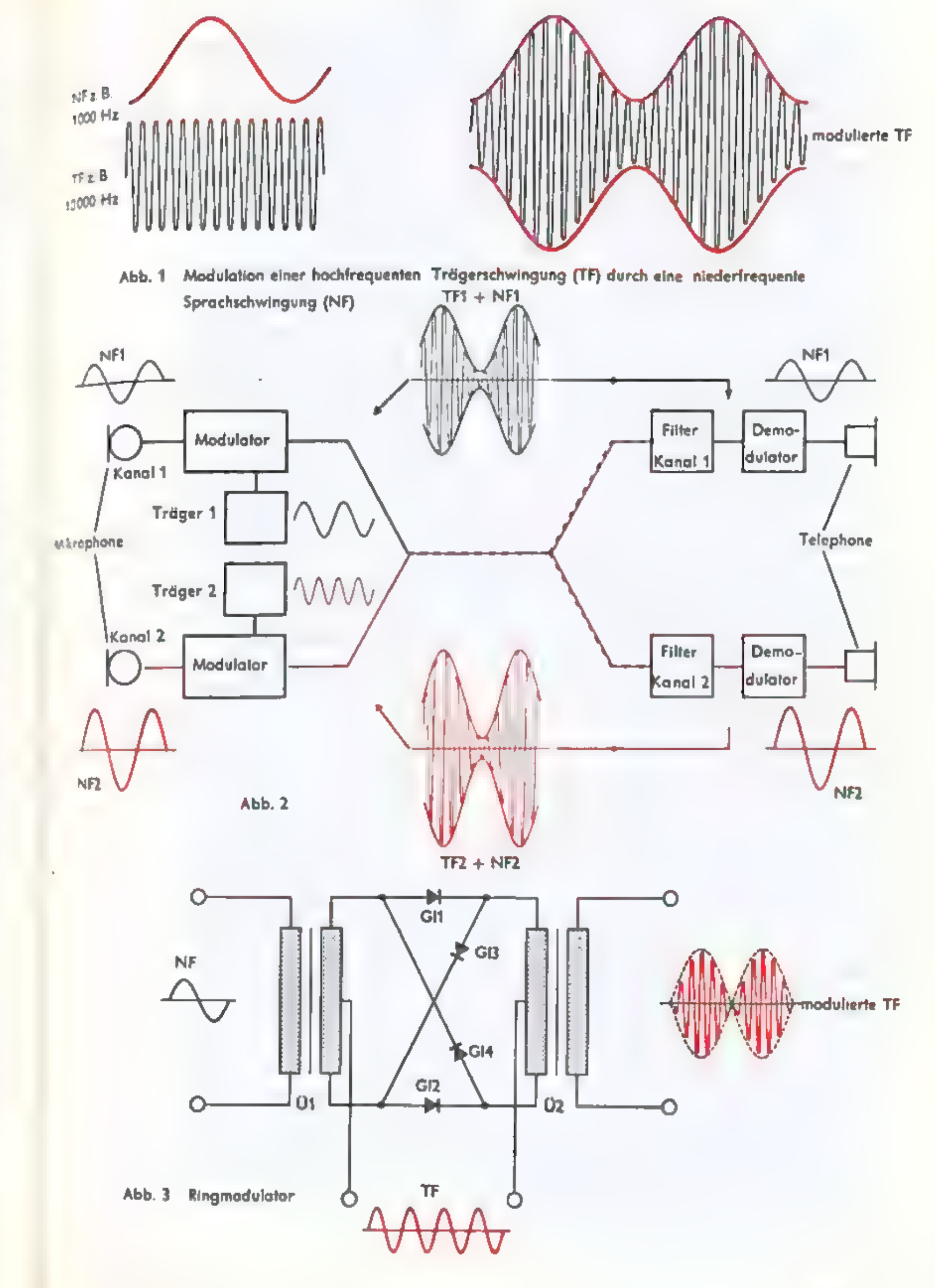


Abb. 1 Modulation einer hochfrequenten Trägerschwingung (TF) durch eine niederfrequente Sprachschwingung (NF)

Abb. 2

Abb. 3 Ringmodulator

UKW-STEREOPHONIE (PILOTTONVERFAHREN)

Bei UKW-Rundfunk wird die Frequenz der vom Sender ausgestrahlten Welle im Takte der akustischen Schwingung, die übertragen werden soll, erhöht und vermindert.
Beim stereophonen UKW-Rundfunk müssen die beiden vorzugsweise für das rechte bzw. linke Ohr bestimmten Schwingungen R bzw. L unabhängig voneinander übertragen werden. Eine Übertragung mit zwei Sendern und zwei Empfängern wäre teuer und technisch kompliziert. Man benutzt deshalb das *Pilottonverfahren:*
Die zwei Mikrophone in Abb. 2 liefern zwei Wechselspannungen R und L, aus denen zunächst das Summensignal (R+L) und das Differenzsignal (R—L) gebildet werden.
An Stelle einer direkt von den Mikrophonen abgenommenen Wechselspannung überträgt der Sender das sogenannte Multiplexsignal, das wie folgt aufgebaut ist (Abb. 3):
Die Amplitude einer 38-kHz-Schwingung wird wie beim Mittelwellenrundfunk proportional zum Signal (R — L) verändert (Amplitudenmodulation). Dadurch entsteht eine Wechselspannung (C), die im 38-kHz-Rhythmus schwankt. Die Wechselspannung (C) wird zum Signal (R+L) hinzuaddiert.
Dieses Multiplexsignal wird wie beim gewöhnlichen UKW-Rundfunk zur Frequenzmodulation des Senders benutzt und steht im Empfänger am Ausgang des Demodulators zur Verfügung. In einem gewöhnlichen UKW-Empfänger wird es lediglich verstärkt und dem Lautsprecher zugeführt.
Das tatsächlich benutzte Verfahren weicht von dem im vorigen Artikel beschriebenen Prinzip aus folgendem Grund ab: Das Multiplex-Signal (D) enthält die vom Summensignal herrührenden Frequenzen bis ca. 15 000 Hz und zusätzlich den Frequenzbereich zwischen (38—15) kHz = 23 kHz und (38+15) kHz = 53 kHz, der vom Signal (R—L) herrührt (Abb. 5 a). Im oberen Frequenzbereich ist die Frequenz 38 kHz besonders stark vertreten, da sie auch dann auftritt, wenn das Differenzsignal (R—L) vorübergehend verschwindet (Schallquelle in der Mitte). Die exakte Übertragung eines solchen Frequenzgemisches durch einen UKW-Sender würde einen großen Frequenzhub, d. h. große Änderungen der Senderfrequenz, erfordern. Man kommt bei gleicher Übertragungsgüte mit geringerem Frequenzhub aus, wenn man den 38-kHz-Träger völlig unterdrückt und stattdessen einen konstanten 19-kHz-Ton, den Pilotton, mitüberträgt. Dieser 19-kHz-Ton wird im Decoder durch einen Resonanzkreis ausgesiebt und nichtlinear verstärkt. Die dabei entstehende 38-kHz-Oberwelle wird nochmals in einem 38-kHz-Resonanzkreis ausgesiebt, verstärkt und dem Multiplexsignal als Ersatz für den unterdrückten Träger hinzugefügt.

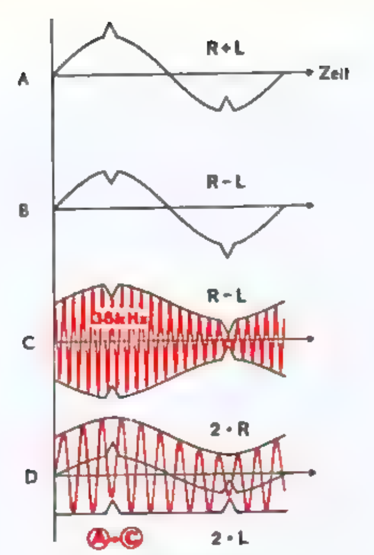


Abb. 1 Aufbau des Multiplexsignals aus (R+L) und einer mit (R—L) amplitudenmodulierten 38 kHz-Schwingung (vereinfacht, 38 kHz-Träger nicht unterdrückt)

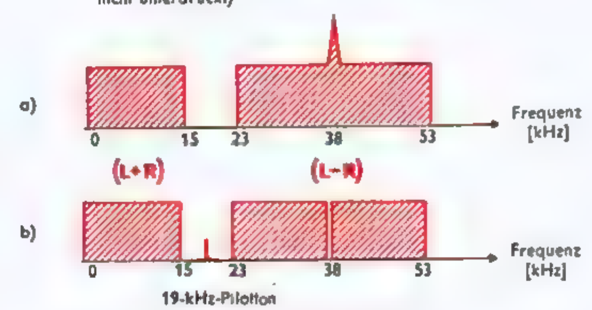


Abb. 2 Frequenzverteilung im Multiplexsignal
a) 38 kHz-Träger vorhanden
b) 38 kHz-Träger unterdrückt und durch 19 kHz-Pilotton ersetzt

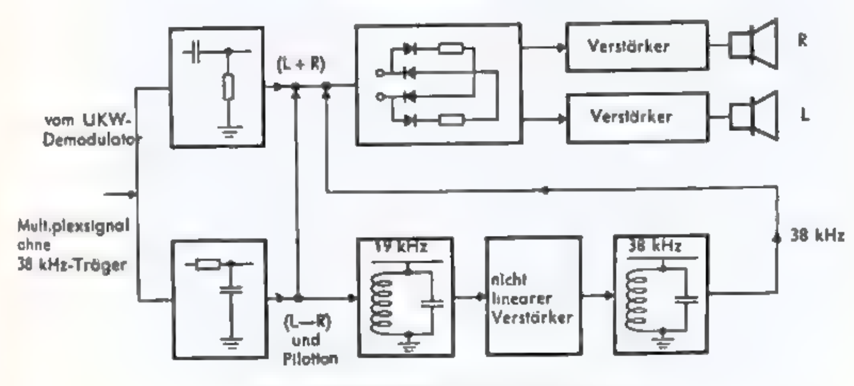


Abb. 3 Blockschaltbild eines Stereodecoders mit nachgeschalteten Niederfrequenzverstärkern

BRAUNSCHE RÖHRE

Die Braunsche Röhre (Kathodenstrahlrohr) besitzt eine Glühkathode, deren Elektronenemission zu einem Strahl gebündelt durch ein Ablenksystem bewegt und auf einem Leuchtschirm als Lichtpunkt sichtbar gemacht wird. Die Bündelung geschieht durch die als elektrische Linse wirkenden Elektroden bzw. durch eine als magnetische Linse wirkende Konzentrationsspule (Abb. 2). Eine elektrostatische Ablenkung erreicht man durch zwei senkrecht zueinander stehende Plattenpaare (Abb. 1) oder durch eine magnetische Ablenkspule (Abb. 2). Der Vorzug der magnetischen Ablenkung liegt darin, daß sich bei geringer Spannung größere Ablenkwinkel erzielen lassen als mit der elektrostatischen. Um flachere Geräte zu erhalten, bevorzugt man daher bei der Verwendung der Braunschen Röhre zum Empfang des Fernsehbildes die magnetische Ablenkung. Der Elektronenstrahl schreibt dann im Zickzack-Gleichschritt mit dem Abtasten beim Sender das Bild auf dem Leuchtschirm auf, wobei der Rücklauf dunkel getastet wird. Der Leuchtschirm besteht aus einer feinverteilten fluoreszierenden Substanz (Hauptbestandteil z. B. Zinksulfid). Durch Beimengungen läßt sich die Farbe des Fluoreszenzleuchtens beeinflussen. Im einzelnen erfolgt die Bündelung des Elektronenstrahles in der elektrischen Linse durch das elektrische Feld, das sich zwischen dem geerdeten Wehnelt-Zylinder (Potential Null) und der plattenförmigen Anode (positives Potential) ausbildet. Die Feldlinien greifen durch das Loch der Anode hindurch, so daß sich Äquipotentialflächen ausbilden, die den gekrümmten Oberflächen optischer Linsen gleichen (vgl. S. 336 und S. 388). Bei der magnetischen Bündelung bewegen sich die Elektronen auf sogenannten Schraubenbahnen. Die elektrostatische Ablenkung der Elektronen im Feld der doppelten Plattenpaare ist mit dem Fall eines Körpers im Schwerefeld vergleichbar. Das einzelne Elektron bewegt sich auf einer parabolischen Bahn. Bei der magnetischen Ablenkung wird die gleiche Wirkung durch das teilweise Durchlaufen einer Schraubenbahn erzielt. Die Ablenkspannungen bzw. -ströme werden durch Kippschwingungen geliefert, die in geeigneter Weise dem besonderen Verwendungszweck in ihrem Verlauf angepaßt werden.

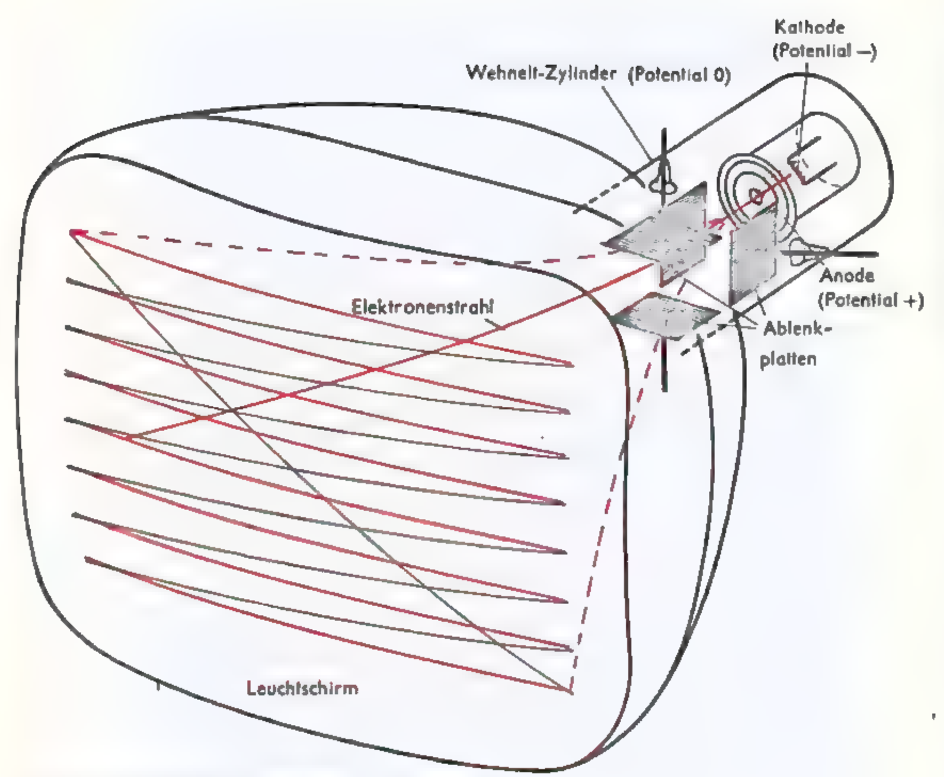


Abb. 1 Elektrostatische Bündelung und Ablenkung in der Braunschen Röhre

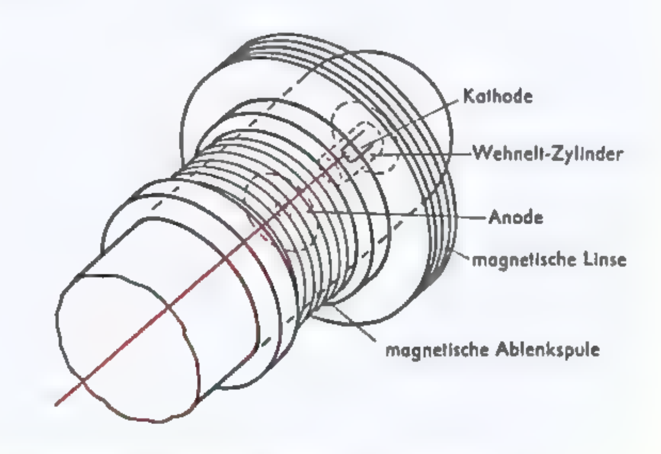


Abb. 2 Vorrichtungen für die magnetische Bündelung und Ablenkung

IKONOSKOP (FERNSEHKAMERARÖHREN)

Das *Ikonoskop* ist die älteste vollelektronische Einrichtung zur Umwandlung eines optischen Bildes in elektrische Signale in einer Fernsehaufnahmekamera. Der wesentlichste Bestandteil des Ikonoskops ist die sog. Mosaikplatte. Sie dient der Auflösung des Bildes in eine gerasterte Punktfolge, ähnlich dem Raster bei der Herstellung einer Autotypie. Im Falle der Mosaikplatte bestehen die Rasterpunkte aus mikroskopisch kleinen Cäsium-(Cs-)Photozellen auf Silberoxid-(Ag_2O-)Unterlage. Mittels eines Objektivs wird der Gegenstand auf die Mosaikplatte abgebildet. Dort werden entsprechend den Helligkeitswerten photoelektrische Aufladungen erzeugt, da die Anode die ausgelösten Elektronen absaugt. Auf der Mosaikplatte entsteht ein den Helligkeitswerten des Bildes entsprechendes Ladungsrelief (Abb. 1). Dieses wird durch einen Elektronenstrahl, der in einem Ansatz erzeugt wird, zickzackförmig abgetastet und entladen. Die einzelnen Silberoxidbeläge bilden jeweils die eine Elektrode eines Kondensators, die durch eine dünne Glimmerschicht von der zweiten metallischen Belegung getrennt ist; diese bildet als gemeinsame Signalelektrode für alle Miniaturphotozellen den zweiten Belag winziger Kondensatoren (Abb. 2). Die Entladungen pflanzen sich als Impulse fort (Abb. 3) und bilden so die Signale, die einem Verstärker und anschließend einem Sender zugeleitet werden. Das 625-Zeilen-Bild der internationalen Fernsehnorm besteht aus rund 500 000 Bildpunkten, zu deren Übertragung rd. 5 Megahertz erforderlich sind. Die Auflösung des örtlichen Nebeneinanders der Bildpunkte durch die Rasterung in ein zeitliches Hintereinander muß zusammen mit dem im Gleichschritt (synchron) vor sich gehenden Bildaufbau aus einzelnen Leuchtpunkten auf dem Leuchtschirm der als Empfänger dienenden Braunschen Röhre (s. S. 330) in weniger als 1/25 s geschehen, da diese Zeitspanne die Flimmergrenze des menschlichen Auges darstellt, dem auf diese Weise das zeitliche Nacheinander der Leuchtpunktfolge als gleichzeitiges, örtliches Nebeneinander eines Bildeindruckes erscheint.

Die Weiterentwicklung der Fernsehaufnahmeröhre hat den Ersatz der Mosaikplatte durch eine dünne, halbleitende Schicht gebracht (z. B. Arsentrisulfid), die durch ihre geringe Leitfähigkeit eine Rasterung entbehrlich macht. Weiterhin hat man die Aufnahmeröhre mit einem Bildwandler (s. S. 336) oder auch einem Sekundärelektronen-Vervielfacher kombiniert und auf diese Weise eine höhere Empfindlichkeit erreicht. Für die erwähnten Entwicklungsstufen haben sich folgende Namen eingebürgert: Röhre mit halbleitender Widerstandsschicht = *Resistron;* desgleichen, aber mit Sekundärelektronen-Vervielfacher = *Orthikon;* desgleichen, jedoch noch zusätzlich vorgeschaltetem Bildwandler = *Superorthikon* (Image-Orthicon).

Auch das *Vidikon* ist eine Röhre zur Umwandlung optischer Bilder in elektrische Signale in Fernsehaufnahmekameras. Seine Funktionsweise beruht auf dem inneren lichtelektrischen Effekt (s. S. 410). Das Vidikon ist träge bei raschem Szenenwechsel (Nachziehen von Bildern), erfordert nur geringen Aufwand und wird daher vorwiegend im Industriefernsehen, bei der Verkehrsüberwachung usw. eingesetzt. Beim Vidikon wird der Gegenstand optisch auf eine dünne Glasplatte abgebildet, deren Rückseite mit einer durchsichtigen Aluminiumschicht belegt ist, die über den Signalwiderstand eine geringe positive Spannung erhält. Auf die Aluminiumbelegung wird eine dünne Halbleiterschicht (z. B. Selen) aufgedampft. Im unbelichteten Zustand ist diese Schicht fast ein Isolator, im belichteten ist sie leitfähig. Ein Elektronenstrahl erteilt der Selenoberfläche nacheinander das Kathodenpotential Null, so daß die Selenschicht mit der Metallisierung einen geladenen Kondensator bildet. Erneute Abtastung ändert an der Ladungsverteilung nichts, da unbelichtetes Selen isoliert.

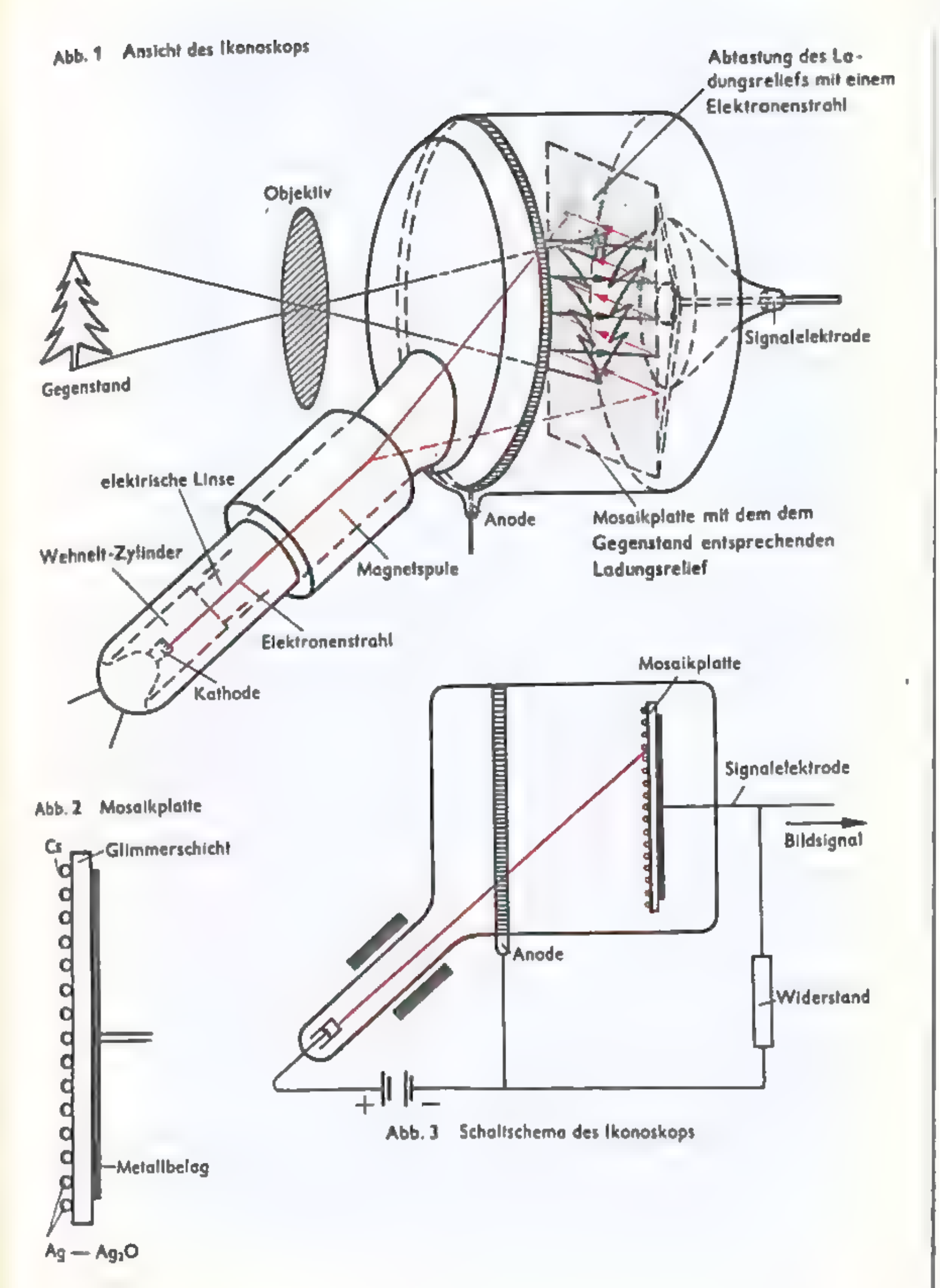


Abb. 1 Ansicht des Ikonoskops

Abb. 2 Mosaikplatte

Abb. 3 Schaltschema des Ikonoskops

SCHWARZWEISSFERNSEHEN

Das Fernsehen bezieht sein Prinzip vom Film, d.h., es überträgt wie dieser mindestens 25 Bilder in der Sekunde, so daß das menschliche Auge wegen seiner Wahrnehmungsträgheit einen kontinuierlichen Bildablauf sieht. Wie im Druckverfahren (s. S. 696) bei der Wiedergabe von verschiedenen Helligkeitswerten (z. B. von photographischen Aufnahmen) bedient man sich zur Bildauflösung der Rasterung (Abb. 1), d.h., das Bild wird in eine sehr große Zahl von Rasterpunkten aufgelöst. Beim Fernsehaufnahmegerät (Ikonoskop, Abb. 2; s. S. 332) besteht die Rasterplatte aus rd. 500000 Rasterpunkten, die in diesem Falle mit mindestens ebenso vielen winzigen Photokathoden identisch sind. Entsprechend den Helligkeitswerten des einzelnen Bildes (Abb. 3) laden sich diese Zellen mehr oder weniger stark positiv auf. Ein über die Rasterplatte in 1/25 s im Zickzack dahineilender Elektronenstrahl entlädt sie, und die dadurch ausgelösten, in ihrer Stärke der Helligkeit der Bildpunkte entsprechenden elektrischen Impulse (Bildsignale) werden der Steuerelektrode der Bildröhre (Braunsche Röhre; s. S. 330) im Empfänger (Abb. 4) zugeleitet, wo sie einen im gleichen Zickzackrhythmus über einen Leuchtschirm gleitenden Elektronenstrahl in seiner Stärke entsprechend der Bildpunkthelligkeit beeinflussen. Auf diese Weise entsteht durch punktweisen Aufbau und rasche Bildfolge ein Punktbild auf dem Leuchtschirm, das wir als Fernsehbild wahrnehmen. Der Bildeindruck ist bei geeigneter Wahl des Leuchtstoffes auf dem Fernsehschirm – dem vorderen Teil der Bildröhre – der eines Schwarzweißbildes, wie es in der Bundesrepublik z. Z. rund 7 Millionen Teilnehmer mit ihren Fernsehgeräten aufnehmen können.
Der Bildinhalt (Abb. 5) der Bildsignale wird den Empfängern der Fernsehteilnehmer zugleich mit dem Ton durch Funk übermittelt. Die Übertragung vom Aufnahmeort bis zum örtlichen Funksender bedient sich aber nicht nur des Funk-, sondern auch des Kabelweges (Koaxialkabel, Tubenkabel). Wegen der Geradlinigkeit der Ausbreitung der hochfrequenten Fernsehwellen haben diese infolge der Erdkrümmung nur eine beschränkte (quasioptische) Reichweite. Es müssen daher im Abstand von rd. 80 km Fernsehsender stehen, um eine einigermaßen gleichmäßige Versorgung der Fernsehteilnehmer zu erreichen (Abb. 6). Die Empfänger entnehmen dem übertragenden elektromagnetischen Feld (der Fernsehwelle) den Bildinhalt mit Hilfe von Antennen, die als Haus- oder (bei ausreichender Feldstärke, d.h. von etwa 5 mV/m ab) als Zimmerantenne ausgeführt sein können.

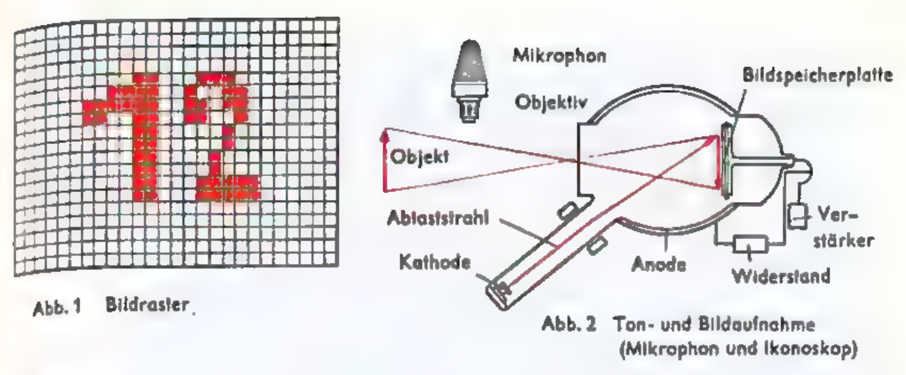


Abb. 1 Bildraster

Abb. 2 Ton- und Bildaufnahme (Mikrophon und Ikonoskop)

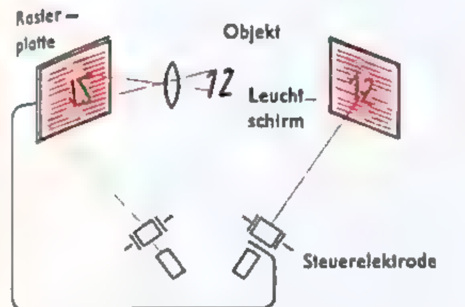


Abb. 3 Ikonoskop (Sender) und Braunsche Röhre (Empfänger) schematisch

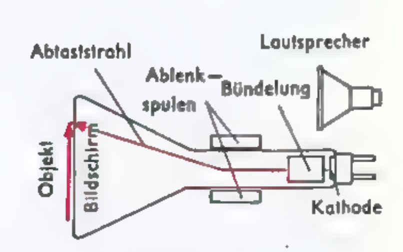


Abb. 4 Ton- und Bildwiedergabe (Lautsprecher und Braunsche Röhre)

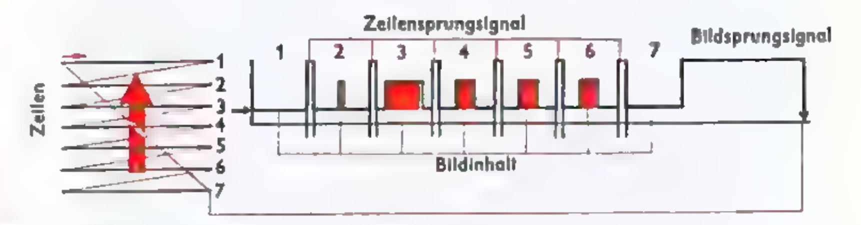


Abb. 5 Abtastung eines Bildes und entsprechende elektrische Signale



Abb. 6 Quasioptische Reichweite der Fernsehwellen erfordert Relaisstationen und Nebensender

BILDWANDLER

Unter einem Bildwandler versteht man eine Apparatur, die Bilder einer optisch nicht wahrnehmbaren Strahlungsart in solche des optischen Bereiches umwandelt. Sie besteht (Abb. 1) im Prinzip aus einer dünnen Photokathode, die auf die unsichtbare Strahlung reagiert. Das entstehende Elektronenbild wird mittels magnetischer oder elektrischer Abbildungslinsen (Abb. 2 und 3) auf den Leuchtschirm projiziert, wo es das sichtbare Bild auslöst. Zur Transformation von Röntgenstrahlen bedient man sich eines Bildwandlers, der eine dünne Aluminiumfolie enthält (Abb. 4), die auf der einen Seite den Röntgenleuchtschirm, auf der anderen die Photokathode enthält. Mit Hilfe des Röntgenbildwandlers lassen sich die Originalschattenbilder elektronisch verstärken. Auf diese Weise kann man z. B. mit einer geringen Bestrahlungsdosis, die den Patienten schont, eine ausreichende Bildhelligkeit erzielen.

Die Wirkungsweise des Bildwandlers beruht auf den Eigenschaften elektrischer und magnetischer Linsen (vgl. S. 388), die Elektronenstrahlen zu bündeln und von einem (elektronischen) Bildpunkt ausgehende Elektronenstrahlen wieder in einem Punkte zu vereinen. Der Begriff „Linse" ist dabei aus der Optik übertragen und bezieht sich auf apparative Anordnungen, die mit der optischen Linse nur das gemeinsam haben, daß sie (physikalisch allerdings unterschiedliche) Strahlenarten bündeln: hier Elektronenstrahlen, dort Lichtstrahlen. Bei der elektrischen Linse erreicht man die Bündelung von Elektronenstrahlen durch die Erzeugung eines elektrischen Feldes (z. B. zwischen zwei koaxialen zylindrischen Elektroden, von denen die zweite eine höhere Spannung besitzt als die erste), das gekrümmte Äquipotentialflächen (Flächen konstanter Spannung) besitzt, die man mit den gekrümmten Oberflächen einer optischen Linse vergleichen kann (Abb. 2). Das einzelne Elektron führt Schwingungen mit beim Fortschreiten in Richtung der Zylinderachsen abklingender Amplitude (Schwingungsweite) aus. Der aus vielen Elektronen bestehende Elektronenstrahl nimmt daher die Form eines sich verjüngenden Schlauches an (wie etwa bei einer Windhose), er wird gebündelt. Die Wirkungsweise der magnetischen Linse (Abb. 3) ist im einzelnen noch weniger mit der einer Linse vergleichbar. Die Elektronen beschreiben im longitudinalen (d. h. der Flugrichtung der Elektronen angenähert parallelen) Magnetfeld Schraubenbahnen; nur der Tatsache, daß Elektronen, die von einem Punkt ausgehen, sich auf verschiedenen Spiralbahnen nach einem oder mehreren Umläufen wieder in einem Punkt treffen, ist der einer Bündelung entsprechende Abbildungseffekt zuzuschreiben. Man bevorzugt magnetische Linsen, weil sie den gleichen Abbildungseffekt wie elektrische Linsen mit niedrigerer und damit ungefährlicherer Spannung erreichen lassen, wozu sie allerdings eine höhere Stromstärke benötigen.

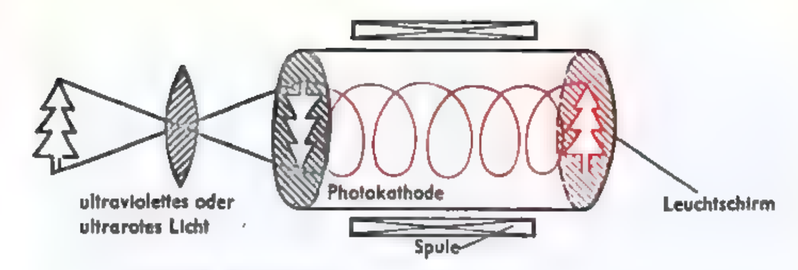


Abb. 1 Prinzip des Bildwandlers

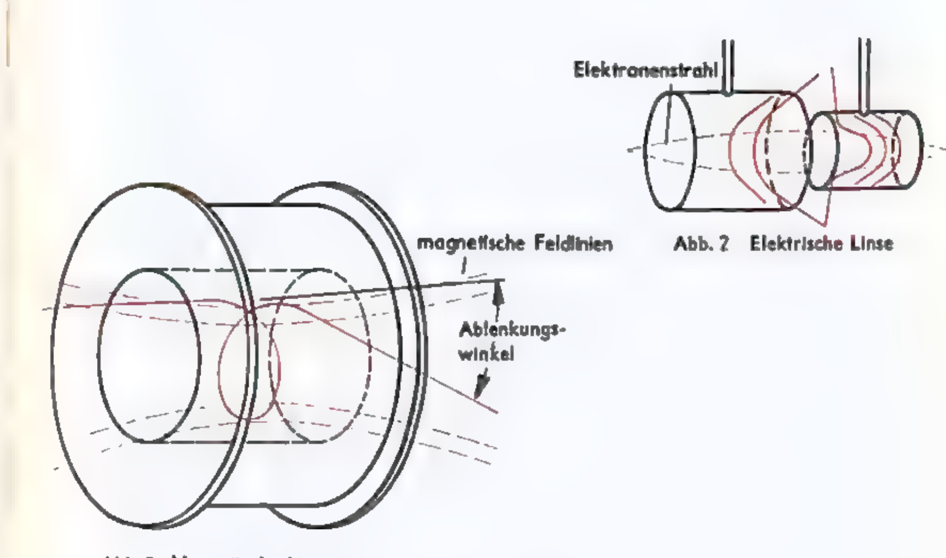


Abb. 2 Elektrische Linse

Abb. 3 Magnetische Linse

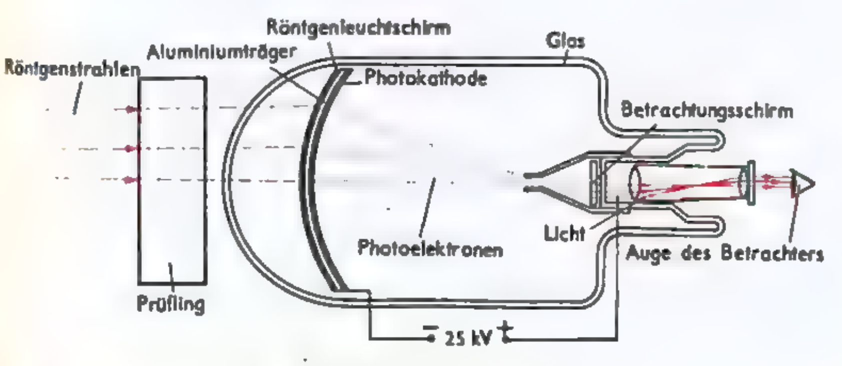


Abb. 4 Röntgenbildwandler (schematisch)

EIDOPHORGERÄT

Das Eidophorgerät nach Fischer (Zürich) dient der Großprojektion von Fernsehübertragungen. Im Gegensatz zum normalen Fernsehbild (s. S. 334), das seine Lichtstärke aus dem Fluoreszenzleuchten des Leuchtstoffes eines von Elektronen beschossenen Bildschirmes bezieht, wird beim Eidophorgerät der Lichtstrom einer sehr starken örtlichen Lichtquelle durch das Fernsehsignal gesteuert. Der von einer Bogenlampe ausgehende (beim Farbfernsehen durch ein Farbfilterrad tretende) Lichtstrom wird durch zwei Gitterblenden (Abb. 1), die durch einen Gitterspiegel mit versilberter Rückseite ersetzt werden können (Abb. 2), über einen Ölfilm und durch ein Projektionsobjektiv auf den Bildschirm gelenkt. Der Ölfilm wird durch einen vom Fernsehsignal gesteuerten Elektronenstrahl je nach dem Helligkeitswert des Signals verschieden stark aufgeladen. Aufgrund der elektrostatischen Abstoßungskräfte wird er dadurch unterschiedlich stark gekrümmt. Die gekrümmte Oberfläche bewirkt eine Änderung in der optischen Abbildung des an ihr gebrochenen bzw. gespiegelten Lichtstromes. Das durch die Balken des Gitterspiegels reflektierte Licht wird auf seinem Rückweg von der Reflexion am Ölfilm verschieden stark durch die Spalten des Spiegels treten, d. h., der Lichtstrom wird durch diesen Effekt, den man nach seinem Entdecker August Toepler als Toeplersche Schlierenmethode bezeichnet, in seiner Stärke vom Fernsehsignal gesteuert. Durch die Abtastung mittels des Elektronenstrahles bildet sich ein den Helligkeitswerten des Bildes entsprechendes Ladungsrelief, dessen optische Steuerwirkung auf den Lichtstrom der örtlichen Lichtquelle das Fernsehbild in großer Lichtstärke in Großprojektion auf dem Bildschirm erscheinen läßt. Die nicht vom Ladungsrelief beeinflußten Lichtstrahlen werden nach Abb. 1 von der oberen Gitterblende, nach Abb. 2 durch den Gitterspiegel zurückgehalten.

Die in der Abb. 2 schematisch gezeichnete Apparatur muß selbstverständlich in einem hochevakuierten Behälter untergebracht sein, da sonst die elektronische Steuerung nicht möglich wäre. Die Aufladung des Ölfilmes klingt langsam ab, daher rotiert er langsam unter dem steuernden Elektronenstrahl hinweg; eine Glättungsschneide sorgt für eine frische, einwandfrei entladene und glatte Oberfläche, ehe der Ölfilm wieder in den Bereich des Elektronenstrahles tritt.

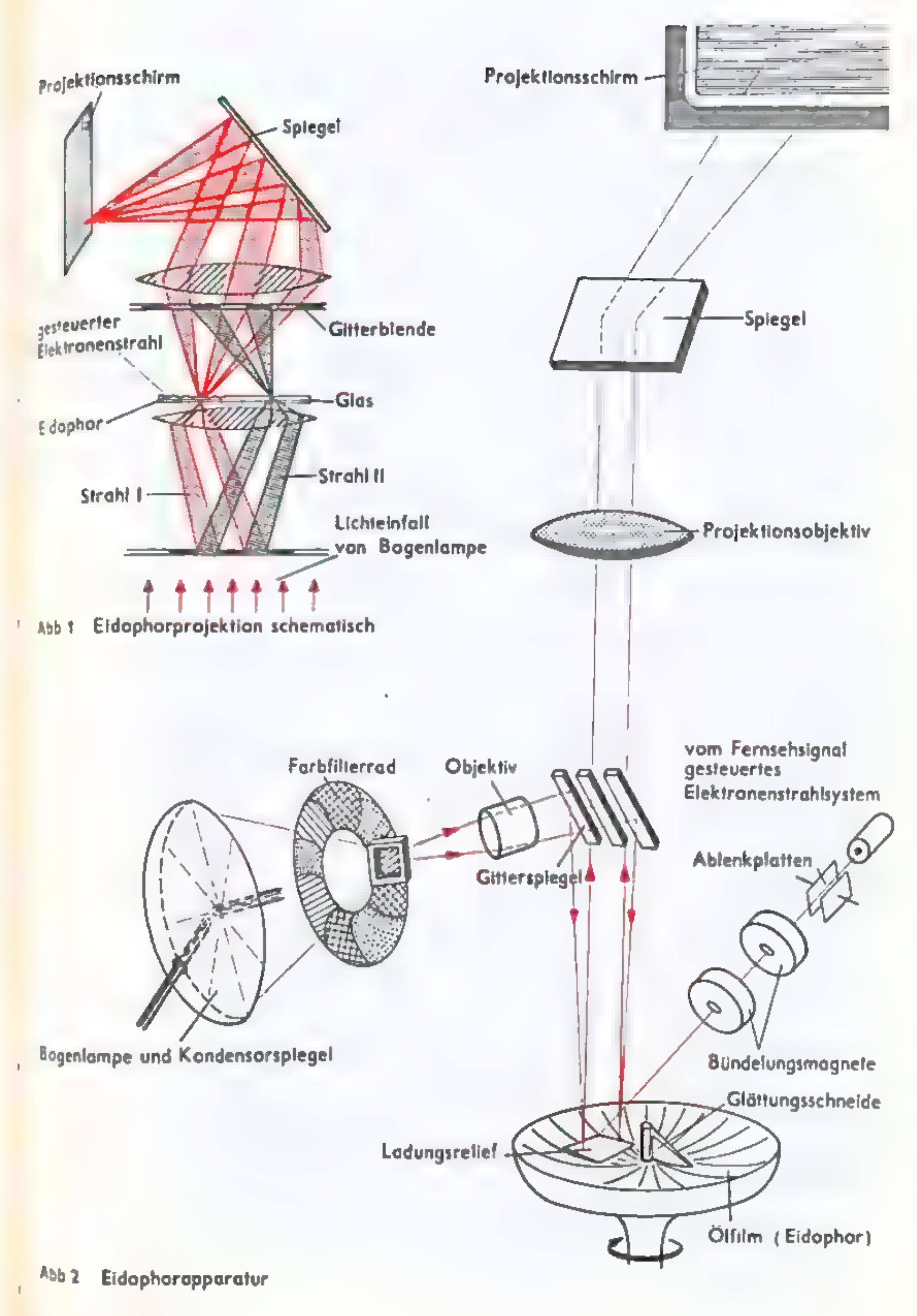


Abb 1 Eidophorprojektion schematisch

Abb 2 Eidophorapparatur

TELEPHON UND FERNSPRECHVERMITTLUNG I

Handapparat abheben: Der Kontakt UI (Abb. 1) schließt und überbrückt den Kondensator C. Jetzt kann ein Gleichstrom von der Leitung bzw. von der Vermittlungsstelle fließen. Dieser Stromfluß hat zur Folge, daß sich die technische Einrichtung der Vermittlungsstelle auf die Aufnahme des Verbindungswunsches vorbereitet. Wenn mit der Nummernwahl begonnen werden kann, hört man im Hörer den Wählton.
Rufnummer wählen: Beim Ziehen der Nummer an der Wählscheibe (s. u.) schließt der Kontakt nsa den Mikrophon- und Telephonstromkreis kurz, bis die Scheibe zurückgelaufen ist. Während des Rücklaufs wird der Kontakt nsi so oft geöffnet und geschlossen, wie die gezogene Zahl angibt. Der Kontakt nsr überbrückt den Kontakt nsi während überflüssiger Betätigungen und sichert die Ruhestellung.
Sprechen: Das Mikrophon M moduliert den obenerwähnten Strom oder gibt von sich aus Sprechwechselstrom ab (elektrodynamisches Mikrophon). Der größte Teil gelangt über die Leitung zum Apparat des Gesprächspartners. Ein kleiner Anteil durchfließt nur den kurzen Stromkreis, der im Apparat aus der Wicklung 1 des Telephonübertragers und dem Widerstand 4 gebildet wird. Der Hauptanteil des Sprechstromes durchfließt ebenfalls eine Wicklung (2) des Übertragers, ehe er auf die Leitung gelangt. Die Wicklungen 1 und 2 sind so geschaltet, daß sich die Wirkungen fast ganz aufheben. In die Wicklung 3 wird daher ein kleiner Anteil des Sprechstromes übertragen, wodurch die eigene Stimme im Hörer schwach mitgehört wird. Diese Anordnung verhindert, daß örtliche Raumgeräusche stören.
Hören: Der aus der Ferne ankommende Sprechstrom durchfließt beide Wicklungen 1 und 2 des Übertragers im gleichen Sinne und wird somit ungeschwächt in die dritte Wicklung übertragen. Das daran angeschlossene Telephon gibt die Sprache des fernen Gesprächspartners wieder. Die beiden zum Telephon parallel geschalteten Gleichrichter (GL) leiten Knall- und Knackgeräusche, die von der Leitung herrühren, am Hörer vorbei (W = Wechselstromwecker).
Wählscheibe (Nummernschalter; Abb. 2): Hinter der Wählscheibe des Fernsprechapparates verbirgt sich ein kleines Zahnradgetriebe mit einem Kontaktwerk. Zieht man an der Wählscheibe eine Nummer, so wird die Uhrfeder gespannt. Nachdem die Scheibe freigegeben wurde, läuft sie, von der Federkraft getrieben, in ihre Ruhelage zurück. Der Rücklauf ist die eigentliche Arbeitsbewegung, sie erfordert eine genaue Drehgeschwindigkeit, wofür über eine drehsinnabhängige Kupplung – der Fliehkraftbremsregler – sorgt. Während des Rücklaufs öffnet der Unterbrecherflügel den Kontakt nsi so oft, wie es der gezogenen Ziffer entspricht. Die Schaltscheibe auf der Wählscheibenwelle betätigt den Kontakt nsa/nsr nur in der Ruhelage und während 2/3 des Weges zwischen dem Fingerloch „1" und dem Fingeranschlag.
Tastenwahl: Fernsprecher, die anstelle der Wählscheibe 10 (oder 12) Drucktasten haben, werden künftig immer häufiger anzutreffen sein. Ihre Arbeitsweise beim Wählen unterscheidet sich grundsätzlich von der Nummernscheibenwahl. Beim Drücken einer Taste sendet ein Transistorgenerator von acht möglichen jeweils zwei Tonfrequenzen über die Leitung zur Vermittlungsstelle (Abb. 3).
Die Schaltung (Abb. 4) arbeitet wie folgt: Wenn der Handapparat abgehoben ist, ist der Kontakt GU geschlossen, der Transistor jedoch durch den Kontakt r kurzgeschlossen. Wird eine der Wähltasten gedrückt, so öffnet r und macht den Transistor wirksam. Der Kontakt a schließt die Mikrophon-Telephon-Schaltung kurz, damit während der Aussendung der Wähltöne vom Mikrophon keine Störtöne übertragen werden können. Gleichzeitig werden die Schwingkreiskondensatoren C3 und C4 durch je einen Kontakt an je eine Anzapfung der Übertrager Ü2 und Ü3 geschaltet. Während die Kontakte r und u von jeder Taste betätigt werden, schließt bei jeder Ziffertaste eine andere Kombination von zwei Schwingkreiskontakten. Die Wecker- und Sprechschaltung ist wie beim Fernsprecher ausgeführt.

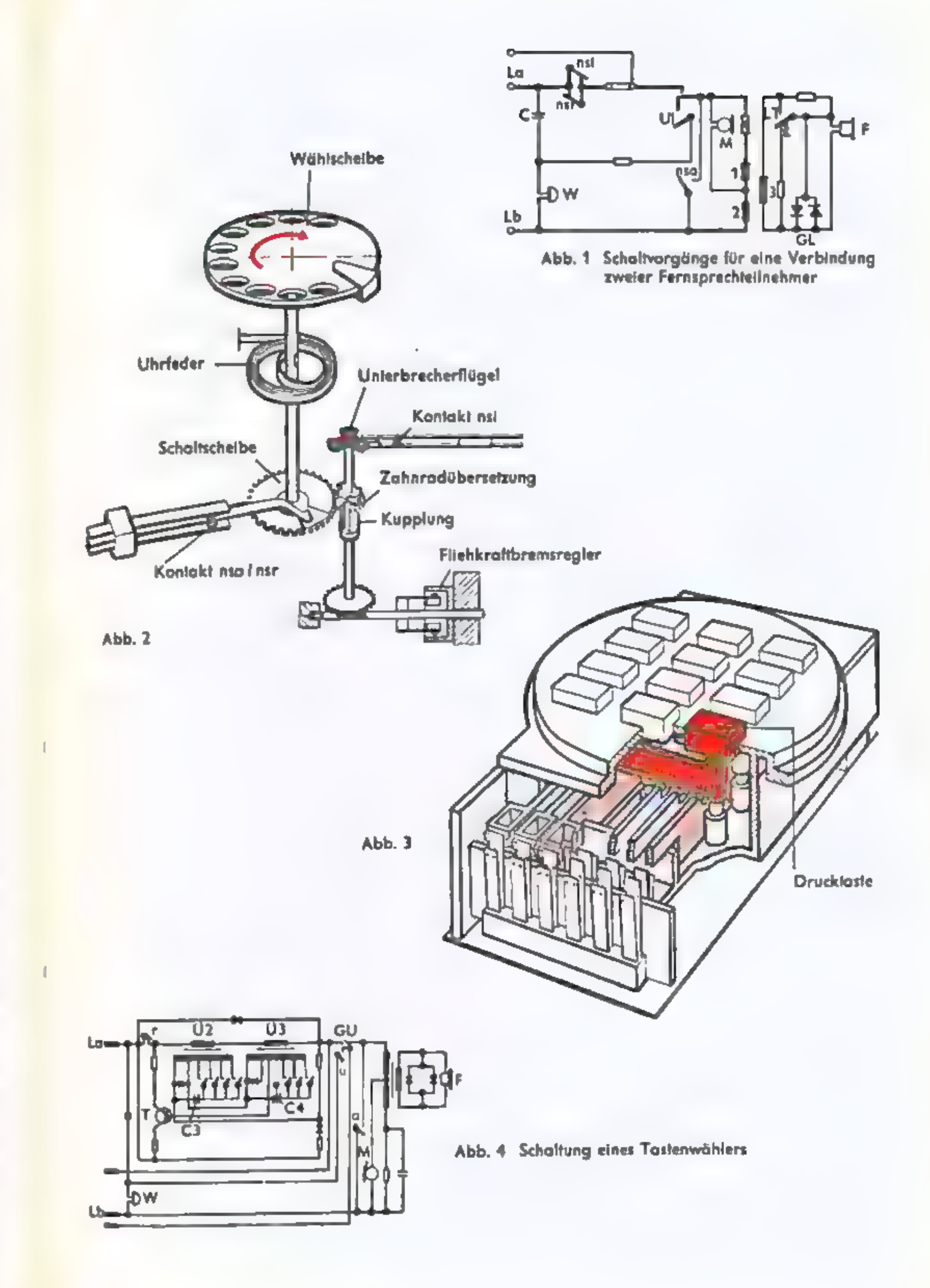


Abb. 1 Schaltvorgänge für eine Verbindung zweier Fernsprechteilnehmer

Abb. 2

Abb. 3

Abb. 4 Schaltung eines Tastenwählers

TELEPHON UND FERNSPRECHVERMITTLUNG II

Mit dem Nummernschalter des Fernsprechapparates (s. S. 340) wird der Stromkreis zur Fernsprechvermittlungsstelle (Amt) der an der Wählscheibe gezogenen Nummer entsprechend oft unterbrochen. Jede Ziffer steuert eine „Wahlstufe", die einen elektromagnetischen Stufenschalter, den „Wähler" enthält. Der Wähler hat einen Eingang und kann nach vielen Ausgängen durchschalten. Je nach der gewählten Ziffer schaltet der erste Wähler auf eine Orts- oder Fernleitung und weitere Wähler – bei Fernverbindungen in anderen Orten – schalten stufenweise Leitungsabschnitt auf Leitungsabschnitt hintereinander, bis der gewünschte Gesprächspartner erreicht ist.
Edelmetall-Motor-Drehwähler (EMD-Wähler): Der Wähler besteht aus dem Motor, dem Einstellglied und der Kontaktbank (Abb. 1). Der Motor unterscheidet sich von den üblichen Elektromotoren; er hat zwei im rechten Winkel zueinander stehende Elektromagnete und einen Z-förmigen Läufer aus Weicheisen, der keine Wicklung trägt. Von der Läuferwelle werden zwei Kontakte betätigt, die die Magnetspulen abwechselnd ein- und ausschalten; es wird immer die Spule ausgeschaltet, die gerade den Läufer angezogen hatte. Durch die Z-Form wird sichergestellt, daß die Anzugskraft der eingeschalteten Spule immer in der gleichen Drehrichtung wirkt. Mit jeder halben Umdrehung des Läufers werden die Kontaktarme des Einstellgliedes um eine Kontaktstelle der Kontaktbank weitergedreht. Zum Stoppen des Motors werden beide Magnetspulen gleichzeitig durch Kontakte eines Relais eingeschaltet. Der Läufer wird dann in einer Zwischenstellung zwischen den Magnetpolen festgehalten. In dieser Stellung stehen die Kontaktarme genau auf der Mitte einer Kontaktstelle. Ein wesentliches Merkmal des EMD-Wählers ist diese Art der Abbremsung des Drehvorganges. Durch sie werden Erschütterungen und Abnutzungen vermieden, die bei den mit Klappankermagneten arbeitenden älteren Konstruktionen zu Störungen führten. Der Einstellsatz trägt die Kontaktarme. Damit die halbkreisförmige Kontaktbank fortlaufend ohne Leerweg von den Kontaktarmen überstrichen werden kann, sind sie paarweise um eine halbe Drehung versetzt angeordnet. Für Ortsverbindungen werden Wähler mit 4, für Fernverbindungen mit 8 Armpaaren benutzt. Je 2 bzw. 4 Arme gleiten über die Kontaktstellen und ermöglichen während der Bewegung einen Stromfluß. Über diese Arme werden Laufen und Stillsetzen des Wählers gesteuert sowie bestimmte Steuerströme übertragen. Die anderen 2 bzw. 4 Arme sind während der Drehung abgehoben. Erst wenn der Motor stillsteht, werden sie elektromagnetisch gegen die zugehörigen Kontaktstellen gedrückt. Diese Arme und die von ihnen erreichbaren Kontaktstellen sind mit Edelmetallauflagen versehen, damit die darübergeleiteten Sprechwechselströme nicht beeinträchtigt werden.
Edelmetall-Schnellkontakt-Relais (ESK-Relais): Mit dem ESK-Relais (Abb. 2 und 3) werden *Koppler* gebaut, die in der Fernsprechvermittlungstechnik an die Stelle von Wählern treten können. Durch die elektronische Steuerungstechnik gewinnen Koppler immer mehr an Bedeutung.
Im ESK-Relais ist die Mechanik, ohne die ein Kontakt nicht bewegt werden kann, auf ein Mindestmaß reduziert worden.
Fünf ESK-Relais sind konstruktiv zu einer Einheit vereinigt. Alle Einzelteile sind ohne Schrauben oder Nieten zusammengefügt.
Das ESK-Relais hat keine getrennten Bauteile für die Betätigung der Kontakte. Die beweglichen Federn der 4 oder 6 Kontakte eines Relais werden direkt vom Magnetfeld der Spule gegen die festen Gegenkontaktfedern gedrückt. An den Berührungsstellen sorgen aufgeschweißte Edelmetalldrähte für einen geringen Übergangswiderstand. Die bewegten Massen sind so gering, daß die Kontakte schon 2/1000 s nach Einschalten der Ansprechspule geschlossen sind.

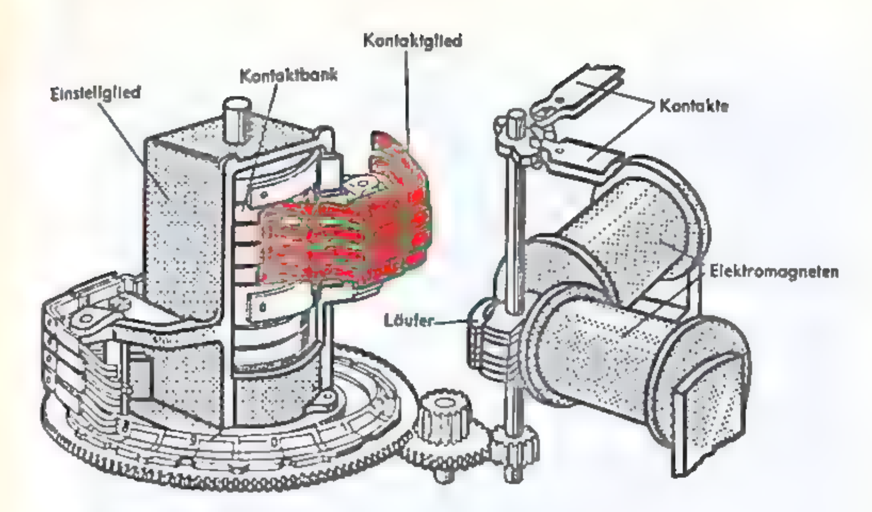


Abb. 1 EMD-Wähler

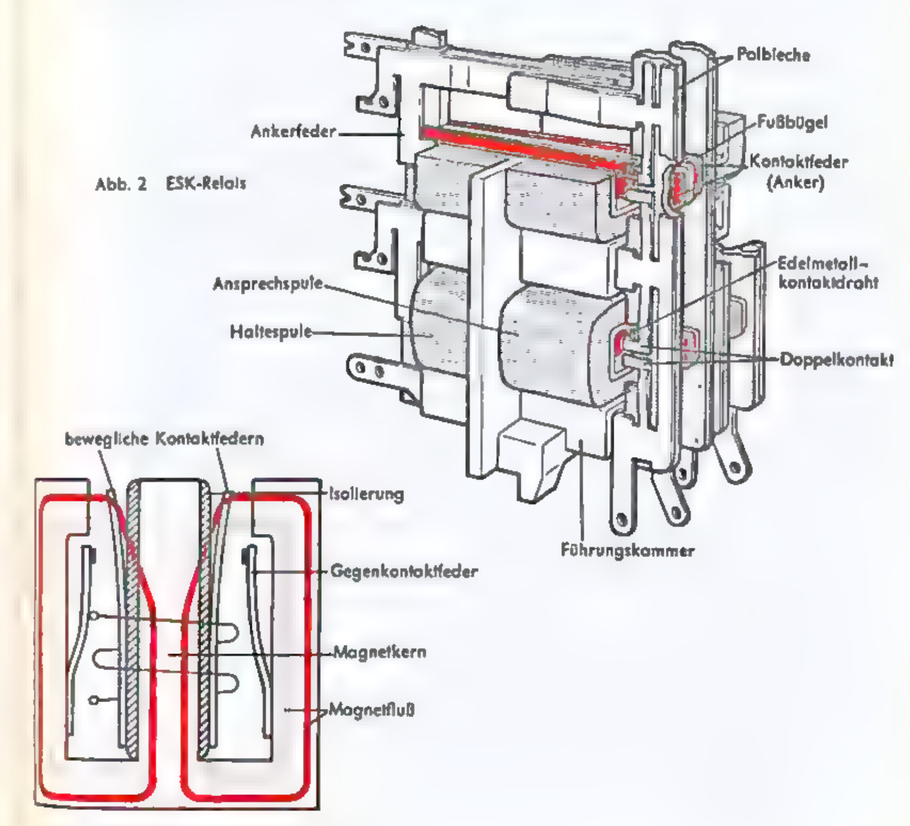
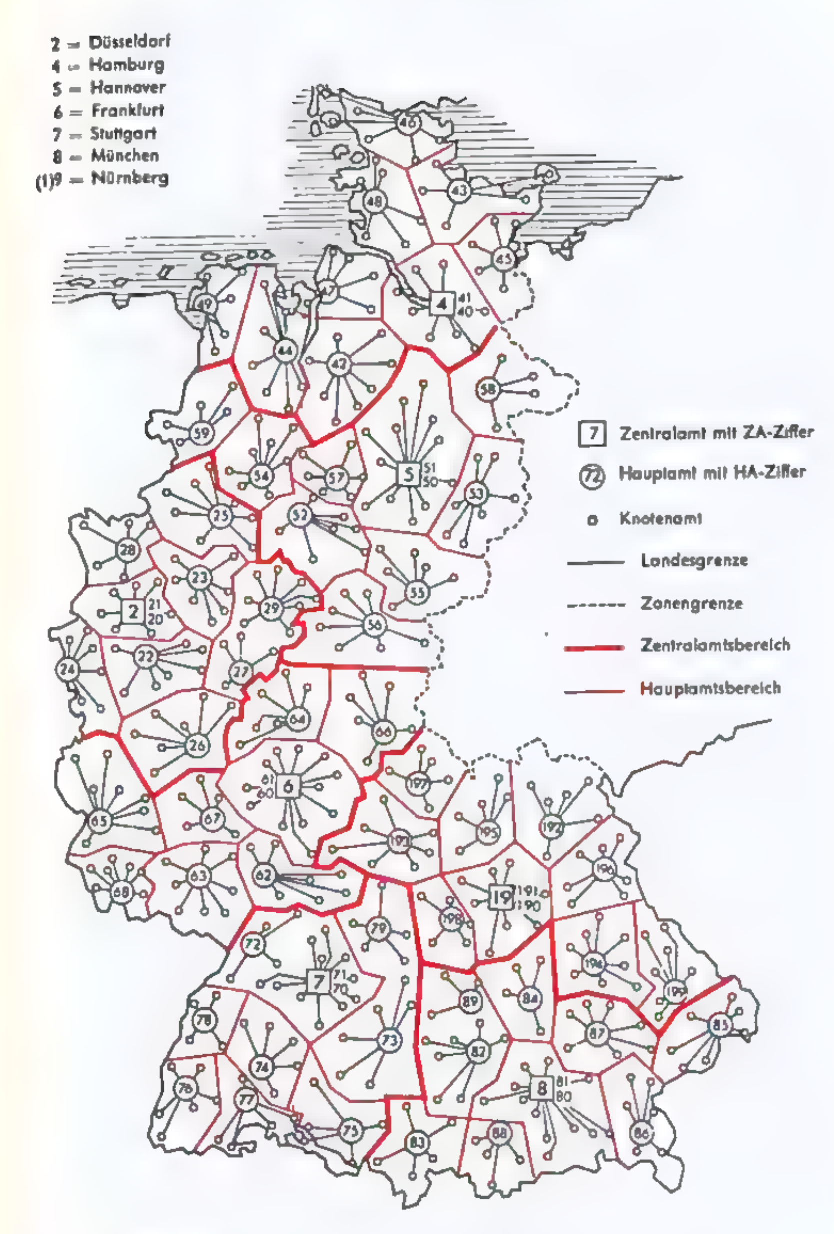


Abb. 2 ESK-Relais

Abb. 3 Wirkungsweise des ESK-Relais mit sich überlagernden Magnetflüssen

TELEPHON UND FERNSPRECHVERMITTLUNG III

Die geschilderten Fortschritte in der Schaltungstechnik (s. S. 340 ff.) haben es ermöglicht, daß heute bereits Versuchsämter mit elektronischen Schaltern eingerichtet werden können. Grundsätzlich läßt sich jedes Relais, das zwei Stellungen (Ein und Aus) kennt, durch ein System elektronischer Bauelemente (z. B. Dioden, Transistoren) in denen ein Elektronenstrom Durchlaß findet oder blockiert wird, ersetzen. Mit diesen Fortschritten ist auch der Netzausbau in größtem Stile parallel gegangen – bis hin zur Auslandsfernwahl. Unverändert an diesem Netz ist der sternförmige Aufbau, wie ihn die Abb. am Beispiel der Bundesrepublik zeigt. In der Bundesrepublik gibt es in der obersten Netzebene 8 ZVSt (Zentralvermittlungsstellen) und zwar: 2 Düsseldorf, 3 West-Berlin, 4 Hamburg, 5 Hannover, 6 Frankfurt am Main, 7 Stuttgart, 8 München, 9 Nürnberg. An jede dieser 8 ZVSt sind sternförmig 8 HVSt (Hauptvermittlungsstellen) angeschlossen, an diese 8 KVSt (Knotenvermittlungsstellen) mit maximal je 8 EVSt (Endvermittlungsstellen). Ist die Anzahl der KVSt bzw. der EVSt größer als eine HVSt bzw. eine KVSt aufnehmen kann, wie dies häufig in der Umgebung von Großstädten der Fall ist (z. B. Hamburg, München), so müssen Doppel-HVSt (00) bzw. Doppel-KVSt (00) eingerichtet werden, wie aus dem Übersichtsplan hervorgeht. In diesem ist das Landesfernwahlnetz in den drei oberen Netzebenen (ZVSt □, HVSt ○ und KVSt o) wiedergegeben. Weiterhin sind die Bereichsgrenzen der ZVSt (rote Linie) und der HVSt (schwächere rote Linie) eingezeichnet. Der sternförmige Aufbau hat Vor- und Nachteile. Der Vorteil liegt darin, daß die aufwendigen und kostspieligen Fernwahleinrichtungen nur im Sternpunkt eingerichtet werden brauchen; der Nachteil, daß bei Störungen irgendwelcher Art in diesen wichtigen, zentralen Stellen sofort größere Fernsprechbereiche in Mitleidenschaft gezogen werden. Für den allmählichen Ausbau war zweifellos das sternförmige Netz weniger kostspielig; eine wirklich wirtschaftliche Betriebsweise garantiert jedoch nur eine den Fernsprechverkehrsbedürfnissen und den Anforderungen an die Betriebssicherheit genügende Vermaschung des Netzes. Diese ermöglicht es, von dem Kennzahlenweg abzuweichen (der stets von der Seite des Anrufers über EVSt, KVSt, HVSt, ZVSt zur ZVSt des Angerufenen und dort zurück über HVSt, KVSt zu dessen EVSt führt) und über eine wirtschaftlichere Querverbindung beispielsweise zwischen den benachbarten HVSt das Gespräch abzuwickeln. Nach Abschluß des Aufbaus des sternförmigen Netzes, wird gegenwärtig die Vermaschung gemäß den auftretenden Erfordernissen Zug um Zug ausgebaut.



Zentralamts- und Hauptamtsbereiche des Bundesgebietes ohne Berlin

TELEGRAPHIE, FERNSCHREIBER

Im ersten Drittel des 19. Jahrhunderts gingen nach der Entdeckung des Elektromagnetismus die Bestrebungen dahin, seine Wirkungen für eine elektrische Nachrichtenübertragung nutzbar zu machen. Nach den verheißungsvollen Versuchen der Professoren Gauß und Weber an der Universität Göttingen im Jahre 1833 entwickelte Morse eine betriebssicher arbeitende Apparatur sowie einen praktisch verwertbaren Kode (Morsealphabet). Die Morseapparatur enthält einen von einer Vorratsrolle ablaufenden Papierstreifen, der an einem Farbrädchen vorbeigleitet. Im Ruhezustand berührt dieses den Streifen nicht, wird jedoch im Betrieb mehr oder weniger lange durch einen Elektromagneten an den Papierstreifen gedrückt, so daß eine Schrift, die aus langen und kurzen punktförmigen Strichen besteht, auf dem Streifen erscheint (Abb. 1). Die Zuordnung von Gruppen solcher Schriftzeichen zum Alphabet hat Morse folgendermaßen gewählt:

			Ziffern:
a ·–	j ·–––	t –	1 ·––––
ä ·–·–	k –·–	u ··–	2 ··–––
b –···	l ·–··	ü ··––	3 ···––
c –·–·	m ––	v ···–	4 ····–
ch ––––	n –·	w ·––	5 ·····
d –··	o –––	x –··–	6 –····
e ·	ö –––·	y –·––	7 ––···
f ··–·	p ·––·	z ––··	8 –––··
g ––·	q ––·–	å ·––·–	9 ––––·
h ····	r ·–·	é ··–··	0 –––––
i ··	s ···	ñ ––·––	

Punkt ·–·–·–	Komma ––··––	Doppelpunkt –––···
Bindestrich –····–	Apostroph ·––––·	Klammer –·––·–
Fragezeichen ··––··	Anführungszeichen ·–··–·	Notruf: SOS ···–––···

In den folgenden Jahrzehnten gingen die Bestrebungen dahin, Buchstabenschrift selbst zu übertragen. Die letzten technischen Entwicklungsstufen sind der Hellschreiber (Abb. 2) und der Fernschreiber (Abb. 3). Der Hellschreiber wie der Fernschreiber bedienen sich eines Stromstoß-Schrittalphabets, das aus insgesamt 7 bzw. 5 Strom- und Trennschritten aufgebaut ist. Der zeitliche Ablauf der Durchgabe der Schrittgruppen (beim mit Fünferkode arbeitenden Fernschreiber $^1/_7$ s/Gruppe) wird durch synchron beim Sender wie beim Empfänger umlaufende Sender- bzw. Empfangsnockenwellen mit je 7 Umdrehungen pro Sekunde gegeben. Die verschiedenen Schrittgruppen (Buchstaben) entsprechen verschiedenen zahnförmigen Einkerbungen in den Sendewählschienen, die sich dem Tastendruck entsprechend in verschiedener Weise verschieben und dadurch die Stromstoßdurchgabe steuern (Abb. 3a). Auf der Empfangsseite werden in analoger Weise Empfangswählschienen so gegeneinander verschoben, daß nur der dem gesendeten Kodezeichen entsprechende Buchstabentypenhebel in die Einkerbungen der Schienen einrastet und damit den Buchstaben auf ein Blatt oder einen Streifen drucken kann (Abb. 3b). Der Anschlag der Buchstaben erfolgt durch elektrischen Antrieb. Der Fernschreiber gleicht äußerlich einer großen Büroschreibmaschine; Schreiben und Gegenschreiben ist mit dem gleichen Fernschreibgerät möglich.
Ein anderer Zweig der Telegraphie ist die Bildtelegraphie: Ein auf einer Trommel befestigtes Bild wird spiralförmig und punktförmig durch einen Lichtstrahl abgetastet. Das reflektierte Licht löst in Photozellen (s. S. 410) Stromschwankungen aus, die den Helligkeitsschwankungen der Bildpunkte entsprechen (Abb. 4a). Auf der Empfangsseite setzt eine Glimmlampe die Stromschwankungen wieder in Helligkeitsschwankungen eines Lichtpunktes (P) um, der über die lichtempfindliche Schicht eines Photopapiers geführt wird (Abb. 4b).

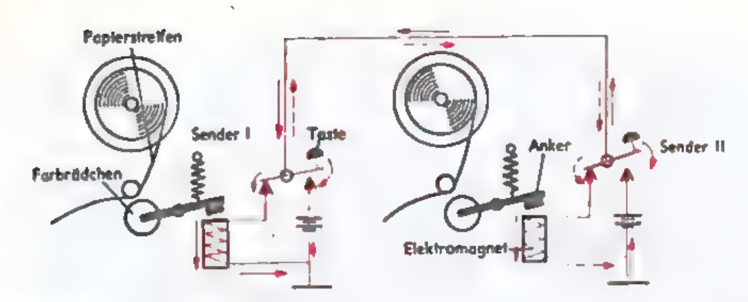


Abb. 1 Morsetelegraphie mit Arbeitsstrombetrieb

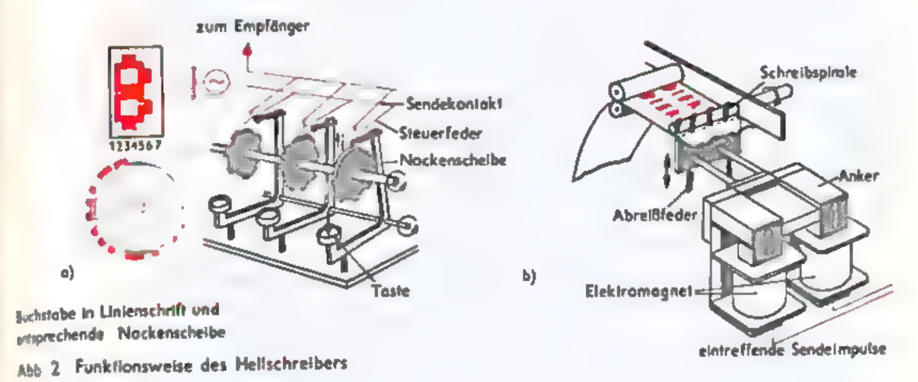


Abb. 2 Funktionsweise des Hellschreibers

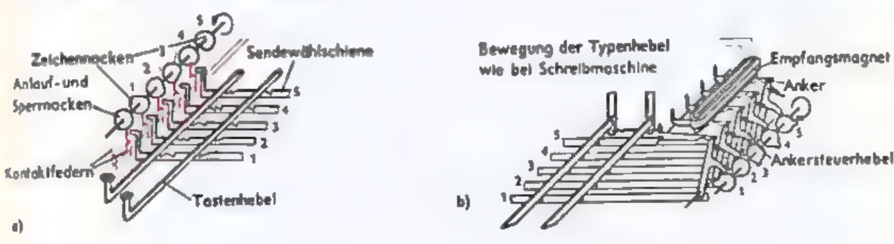


Abb. 3 Funktionsweise des Fernschreibers

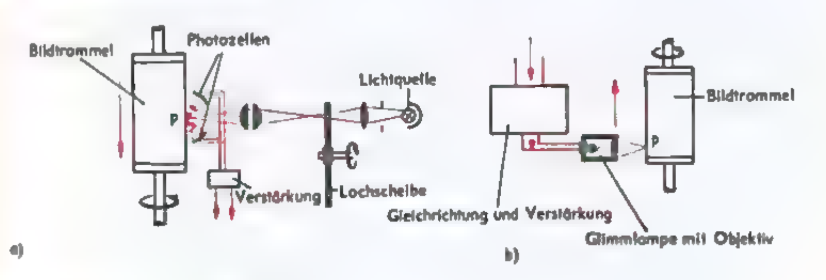


Abb. 4 Funktionsweise des Bildtelegraphen

RADAR

Unter Radar (Abkürzung für die englische Bezeichnung *Radio Detecting and Ranging)* versteht man ein elektromagnetisches Echoverfahren, bei dem eine Abtastung des Raumes mit Hilfe einer hochfrequenten elektromagnetischen Strahlung erfolgt. Überall dort, wo diese Strahlung auf Hindernisse stößt, wird sie mehr oder weniger stark reflektiert. Der reflektierte Strahl wird wieder empfangen. Er vermittelt durch seine Stärke und Richtung Informationen über den Gegenstand, der seine Reflexion verursacht: z. B. Angaben über Ausdehnung, Entfernung oder Höhe des georteten Gegenstandes (daher die deutsche Bezeichnung Funkmeßtechnik).

Wenn man sich einen Gesamtüberblick über ein zu beobachtendes Gebiet verschaffen will, läßt man z. B. von einem Flugzeug aus (Abb. 1) einen Radarstrahl rotierend ausstrahlen. Er bestreicht dann einen Kreisflächenbereich, aus dem er in jedem Augenblick einen Sektor ausleuchtet. Je nach der Beschaffenheit der reflektierenden Gegenstände (in diesem Falle an der Erdoberfläche) ist die Intensität des reflektierten Strahles verschieden stark (Abb. 2). Ausstrahlung und Empfang der hochfrequenten Strahlung vollziehen sich im Radargerät (Abb. 3). Die Erzeugung der Radarwellen erfolgt im Sendegerät, das mit Elektronenröhren spezieller Bauart ausgestattet ist (Klystron, Magnetron). Die abstrahlende Antenne empfängt auch die reflektierten Strahlen (periodisches Umschalten). Die empfangenen Strahlen werden dann über ein Empfangsgerät einer Braunschen Röhre (s. S. 330) zugeführt. Dort wird der Strahl so abgelenkt, daß er radial den Leuchtschirm vom Mittelpunkt zum Rand hin abtastet und sich gleichzeitig mit der Drehgeschwindigkeit der Antenne dreht. Ein aufgefangenes Echo bewirkt eine Verstärkung des Elektronenstromes in der Röhre, worauf auf dem Bildschirm ein Punkt aufleuchtet und bis zum Eintreffen neuer Echos nachleuchtet. So entsteht aus den Leuchtpunkten ein Bild des beobachteten Raumes; seine Helligkeitsverteilung ist jeweils vom Reflexionsvermögen der betreffenden Stelle gegenüber den hochfrequenten Schwingungen abhängig. Ein Radarbild sieht daher ganz anders aus als das entsprechende optische Bild, doch haben in der Regel beide die gleichen Konturen (Abb. 4). Das Lesen und Deuten der Radarbilder erfordert intensive Schulung und besonderes Geschick.

Das Radarverfahren verdankt seine Entwicklung den Erfordernissen des letzten Krieges. Inzwischen hat es auch einen weiten friedlichen Anwendungsbereich gefunden, z. B. im Flugsicherungsdienst, in der Schiffahrt und bei der Wetterbeobachtung.

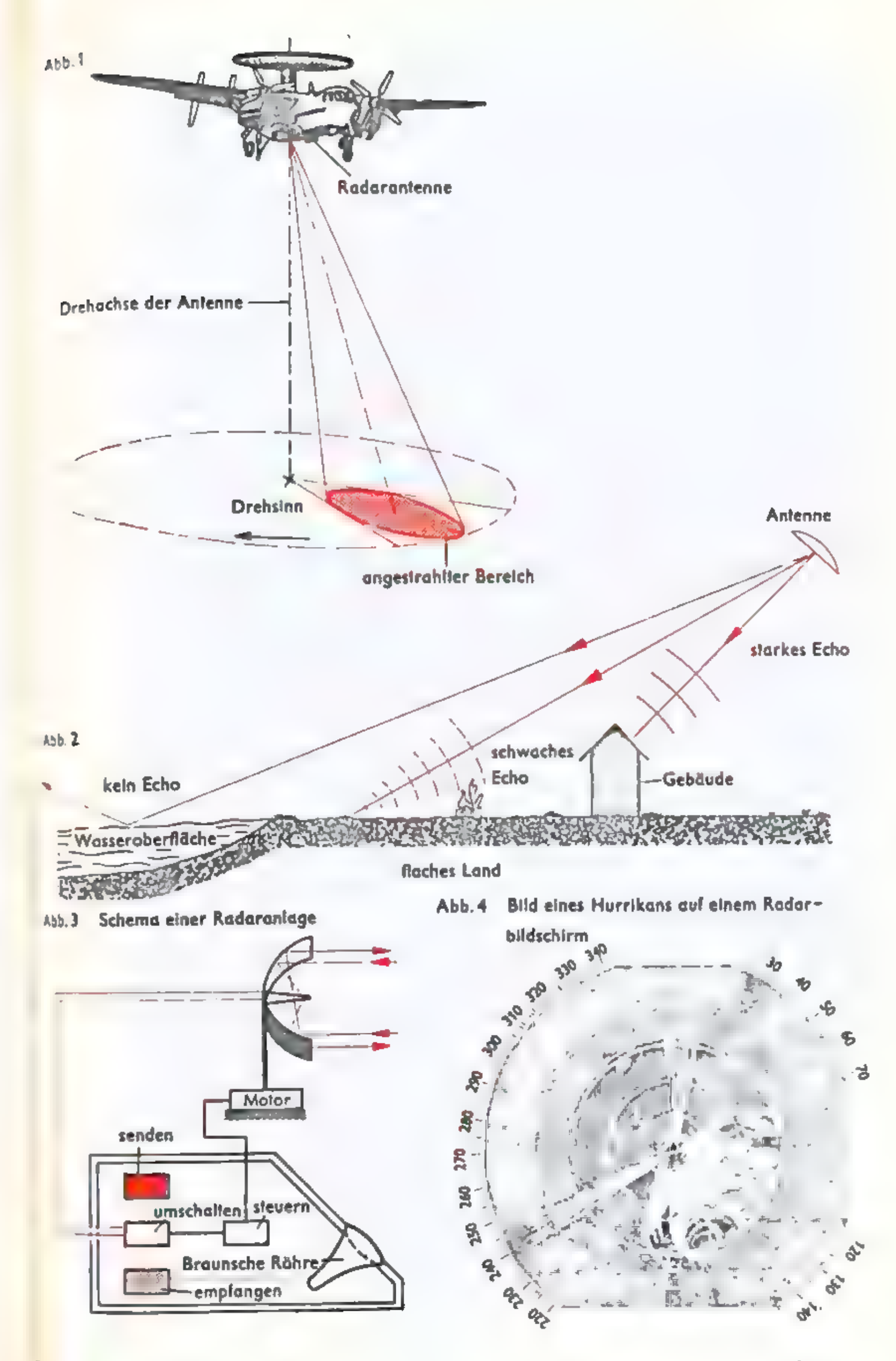
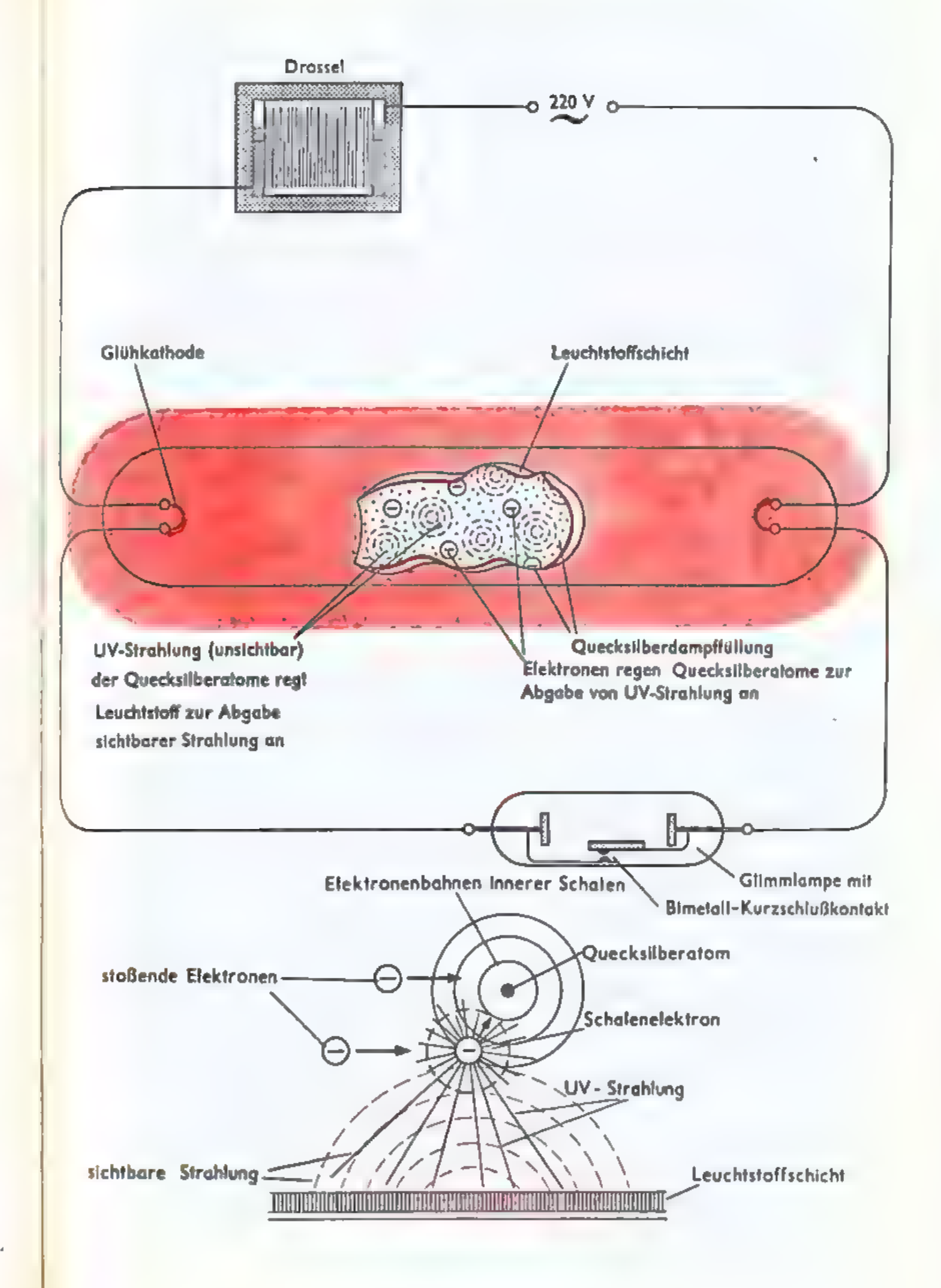


Abb. 3 Schema einer Radaranlage

Abb. 4 Bild eines Hurrikans auf einem Radarbildschirm

LEUCHTSTOFFLAMPE

Die Leuchtröhre ist ein Gasentladungsrohr, dessen Lichtausbeute durch besondere Maßnahmen so gesteigert ist, daß es für Beleuchtungszwecke verwendet werden kann. Das Rohr wird zunächst auf seiner Innenwand mit einer Leuchtstoffschicht ausgekleidet; diese Schicht besteht meist aus fluoreszierenden oder phosphoreszierenden Metallsalzen (Calciumwolframat, Zinksulfid, Zinksilikat). Darauf wird das Rohr mit Quecksilberdampf von einigen Hundertstel Torr gefüllt (Torr ist eine physikalische Einheit des Druckes und entspricht 1/760 atm [=1 mm Quecksilber]). Die aus den Gluhelektroden austretenden Elektronen (s. S. 310) regen durch Stoß die Quecksilberatome zur Ausstrahlung einer zu rd. 60% ultravioletten (UV-) Strahlung an, die unsichtbar ist. Der sichtbare Anteil des Quecksilberdampflichtes liegt im grünen und blauen Bereich des Spektrums (s. S. 380) und bildet ein fahles Licht. Die UV-Strahlung fällt auf den Leuchtstoff an der Innenwand der Röhre. Dieser absorbiert die Strahlung und emittiert dafür eine längerwellige Strahlung, d. h., der Leuchtstoff transformiert die unsichtbare Strahlung in sichtbares Licht. Durch geeignete Wahl des Leuchtstoffes kann man dem Licht der Leuchtstofflampe jede gewünschte Farbe geben. Zum Betrieb der Lampe benötigt man eine Drossel, die ein schädliches Anwachsen der Stromstärke verhindert und die Zündung vermittelt. Hierzu dient eine parallelgeschaltete kleine Glimmlampe mit einem thermischen Kontakt. Beim Einschalten zündet zunächst die Glimmlampe (bei offenem thermischen Bimetallkontakt). Dadurch wird der Bimetallstreifen erwärmt, schließt die Glimmlampe kurz, bringt die Glühkathoden zum Glühen und unterbricht wieder, weil er sich abkühlt. Die Unterbrechung erzeugt mittels der Drossel einen Spannungsstoß, der ausreicht, die Leuchtstofflampe selbst zu zünden. Die kleine Glimmlampe zündet wegen des Nebenschlusses durch die Lampe nicht mehr. Der Bimetallstreifen (vgl. S.360) hält den thermischen Kontakt offen. Die Glühkathoden glühen infolge Rückheizung (Aufprall positiver Quecksilberionen) weiter und der oben geschilderte Prozeß der Erzeugung sichtbaren Lichtes in der Leuchtstofflampe hält an. Da es sich beim Leuchten der Leuchtstofflampe nicht um das von einem glühenden Körper (z. B. Glühdraht der Glühlampe) ausgesandte Licht handelt, sondern um das Anregungsleuchten von Atomen (des Quecksilberdampfes und der Leuchtstoffschicht), ist die Lichtausbeute außerordentlich wirtschaftlich. Wegen ihrer breiten Leuchtfläche liefern die Leuchtstofflampen ein angenehmes, nur weiche Schatten erzeugendes Licht.



ELEKTRIZITÄTSZÄHLER (ARBEITSMESSER)

Zur Messung der elektrischen Arbeit, die wir für Industrie- und Haushaltszwecke von Kraftwerken beziehen, benötigt man zur genauen Rechnungslegung Elektrizitätszähler. Die Arbeit bei Gleichstrom ist $A = U \cdot I \cdot t$, bei Einphasenwechselstrom $A = U \cdot I \cdot t \cdot \cos\varphi$ (vgl. S.302), wobei U die elektrische Spannung, I den elektrischen Strom, $\cos\varphi$ den Leistungsfaktor bei Wechselstrom und t die Zeit bedeuten. Bei Gleichstrom kann die Arbeit durch Ermittlung des Wertes $I \cdot t$, d.h. mittels eines Amperestundenzählers bestimmt werden, sofern die Spannung U im Netz konstant gehalten wird. In Wechsel- und Drehstromnetzen werden jedoch nur Wattstundenzähler verwendet.

Abb. 1 zeigt einen elektrolytischen Zähler (Stia-Zähler), der nur für Gleichstrom verwendet werden kann. Er hat heute praktisch nur noch historisches Interesse. In einem geschlossenen Glasgefäß befindet sich eine Quecksilbersalzlösung als Elektrolyt. Sie wird von einem Teil des Verbraucherstroms durchflossen, wodurch sich an der Kathode eine der Größe $I \cdot t$ proportionale Menge Quecksilber abscheidet. Das Quecksilber sammelt sich im unteren Teil des Gefäßes. Die Meßskala ist direkt in kWh eingeteilt. Nach Lösung einer Plombe kann das abgeschiedene Quecksilber in den oberen Raum zurückgebracht werden.

Abb. 2 zeigt einen Amperestunden-Motorzähler, der einen kleinen Gleichstrommotor darstellt. Der scheibenförmige Aluminiumanker, der im magnetischen Feld eines Permanentmagneten liegt, enthält drei Spulen, die ihren Strom von einem dreiteiligen Kollektor erhalten. Dieser Kollektor stellt die Stromrichtung so ein, daß eine fortlaufende Drehung des Ankers zustande kommt. Der über Edelmetallbürsten dem Kollektor und damit den Spulen zugeführte Strom ist, da er von einem Reihenwiderstand R im Verbraucherkreis (s. Abb. 2b) abgezweigt wird, dem Verbraucherstrom proportional. Da die Feldstärke des Permanentmagneten konstant ist, ist die Drehzahl des Ankers der Stromstärke proportional. Das an der Ankerwelle befindliche Zählwerk registriert die Umdrehungen, die dem Produkt $I \cdot t$ entsprechen. Bringt man statt des Permanentmagneten eine Spule an, die das Magnetfeld erzeugt, und legt man an diese Spule die Verbraucherspannung U (oder durch Vorschalten eines Widerstandes eine Spannung, die U proportional ist), so ist die Drehzahl des Zählers sowohl U als auch I und damit dem Produkt $U \cdot I$ proportional. Das Zählwerk registriert dann direkt die Arbeit $U \cdot I \cdot t$. Aus dem Amperestundenzähler ist ein echter Wattstundenzähler geworden.

Bei Wechselstrom finden heute allgemein sog. Induktionszähler Verwendung, die keinerlei Kollektor benötigen (Abb. 3). Sie besitzen zwei Elektromagnete. Die Spule des einen wird vom Verbraucherstrom durchflossen, an der Spule des anderen liegt die Verbraucherspannung. Im ersteren wird also durch den Verbraucher*strom*, im letzteren durch die Verbraucher*spannung* ein Kraftfluß erzeugt. Liegen beim Verbraucher Strom und Spannung in Phase (s. S.302), so wird der Strom der Spannungswicklung und damit das Feld des Spannungseisens um eine Viertelperiode (90°) hinter dem Strom der Stromwicklung und damit dem Feld des Stromeisens nacheilen. Dadurch wird ein wanderndes Magnetfeld erzeugt, das in der drehbaren Metallscheibe Wirbelströme induziert, die die Scheibe in der Bewegungsrichtung des Wanderfeldes zu drehen suchen. Die Drehzahl der Scheibe ist den Feldstärken beider Felder, also Strom und Spannung, proportional. Sie hängt aber auch von der Phasenverschiebung beider (und damit vom Leistungsfaktor $\cos\varphi$) ab. Dies wird verständlich, wenn man sich den Fall vorstellt, daß der Verbraucher 90° Phasenverschiebung zwischen U und I ($\cos\varphi = 0$) bewirkt; dann kommen beide Magnetfelder in Phase, so daß keine Drehung der Metallscheibe mehr zustande kommen kann. Der rechts in der Abb. 3 eingezeichnete Bremsmagnet erzeugt in der Scheibe dauernd Wirbelströme, die die Scheibenbewegung dämpfen und den sofortigen Stillstand bei Wegfall des Verbraucherstroms sichern.

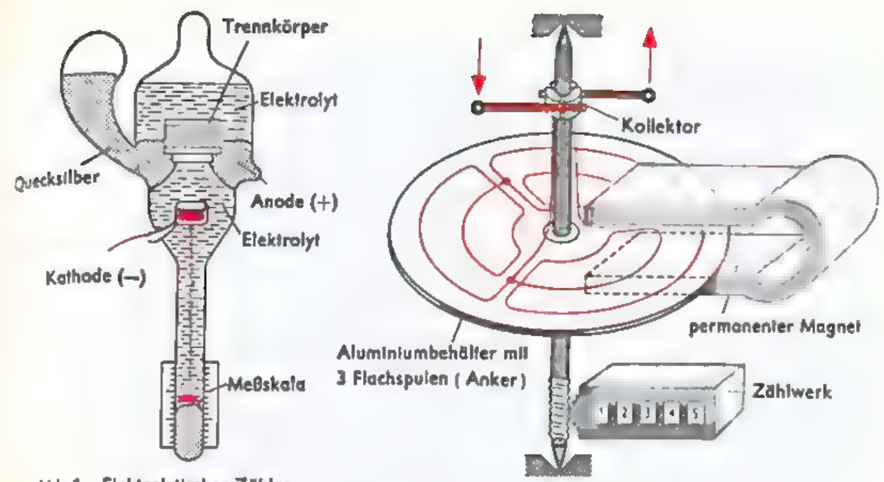


Abb. 1 Elektrolytischer Zähler

Abb. 2a Magnetmotorzähler schematisch

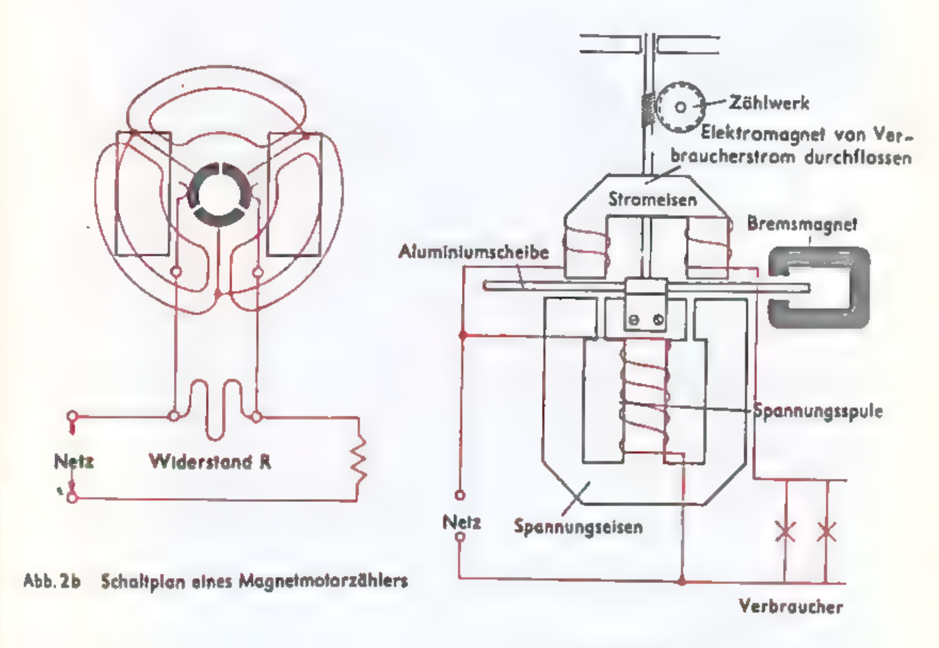


Abb. 2b Schaltplan eines Magnetmotorzählers

Abb. 3 Induktionszähler

MESSMETHODEN DER PHYSIK I

Da die physikalische Messung die Grundlage jeder experimentellen physikalischen Forschung ist, kommt der Meßtechnik eine wichtige Rolle zu. Die ganze Vielfalt physikalischer Meßverfahren baut sich auf verhältnismäßig wenigen experimentellen Methoden auf.

Bei einer physikalischen Messung wird ein physikalisches System derart von der Außenwelt abgeschirmt, daß gewisse, das System beschreibende Größen in wählbarer Art verändert, andere konstant gehalten werden können. So wird z. B. bei isothermen Untersuchungen der Thermodynamik das untersuchte System in ein Wärmebad mit konstanter Temperatur gebracht, z. B. bei der Messung der gegenseitigen Abhängigkeit $pV=$ konstant von Druck p und Volumen V einer festen Menge eines Gases bei konstanter Temperatur (Boyle-Mariottesches Gesetz, Abb. 1).

Ein ideales Experiment, bei dem außer den gewünschten kontrollierbar veränderlichen Größen alle anderen konstant bleiben, läßt sich nie durchführen. Das Experiment muß möglichst so angelegt werden, daß sich die Veränderungen mit hinreichender Genauigkeit berechnen, durch besondere Auswertverfahren unterdrücken oder durch Regelanlagen klein halten lassen. Im Prinzip arbeitet eine Regelanlage wie es in Abb. 2 dargestellt ist. Die Versuchsanordnung, bei der ein bestimmter Parameter konstant gehalten werden soll, wird gewöhnlich „Regelstrecke" genannt. Der tatsächliche Istwert I dieses Parameters wird mit der Steuergröße S (hier gleich dem Sollwert) verglichen, die Überlagerung durch den Regler in geeigneter Weise als Stellgröße s dem System (der Regelstrecke) zugeführt, so daß dem Abweichen vom Sollwert entgegengewirkt wird. Zusätzlich muß noch wegen nicht kontrollierbarer Einflüsse eine Störgröße i eingeführt werden, die zur Stellgröße addiert wird.

Ein Thermostat ist eine der einfachsten Realisierungen einer Regelanlage. Das Beispiel der Abb. 4: Der Thermostat T wird durch die Heizwicklung H geheizt, die innen herrschende Temperatur durch das Thermoelement ThE gemessen. Dessen Thermospannung wird dem Regler zugeführt, der in geeigneter Weise die an H liegende Spannung ändert, z. B. dadurch, daß mit Hilfe der Thermospannung ein Motor M gesteuert wird, der den Abgriff am Heizstromwiderstand HR verschiebt. ThE bezeichnet man als Meßfühler, M als Stellmotor, HR als Kraftschalter, M und HR zusammen als Regler. Der Widerstand R, an den eine Hilfsspannung angelegt wird, dient zum Einstellen eines beliebigen Temperaturwertes. Die Störgröße i entsteht durch Änderungen der Heizstromspannungen U.

Experimente lassen sich als Relativ- oder Vergleichsmessung oder als Absolutmessung durchführen. Bei der Relativmessung werden zwei Meßobjekte bis auf die zu messende Größe gleichen Bedingungen ausgesetzt und dann verglichen, bei der Absolutmessung wird die Meßgröße in absoluten Einheiten bestimmt.

Vergleichsmessungen sind meist einfacher und genauer, Absolutmessungen können mit den Ergebnissen anderer Messungen verglichen werden. Die Messung des Alterns (nicht rückgängig zu machende Längenänderung) eines Metallstabes durch Kaltstreckung z. B. kann durch Vergleich zweier gleichlanger, gleichartiger Stäbe (von denen nur einer gestreckt wurde) in einem beliebigen Wärmebad geschehen. Dabei wird durch die gleiche Temperatur der wichtigste Störparameter „Temperaturunterschied" ausgeschaltet. Oder aber: Die Länge eines Stabes wird in einem Thermostaten mit genau konstanter und bekannter Temperatur gemessen, der Stab kalt gestreckt und wieder gemessen.

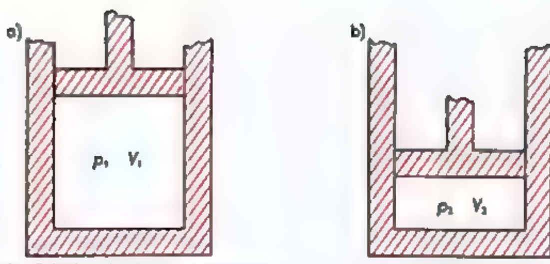


Abb. 1 Wenn der Schieber (Kolben) aus Stellung a) in Stellung b) gebracht wird, gilt für p und V das Boyle-Mariottesche Gesetz

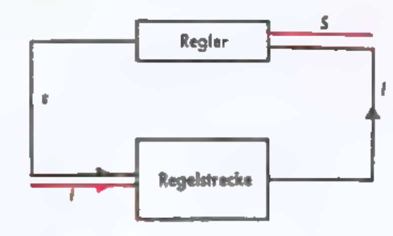
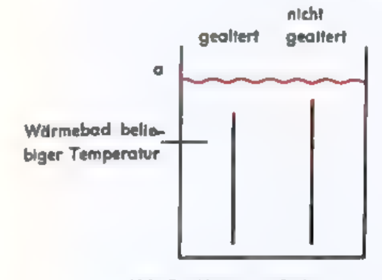


Abb. 2 Regelanlage



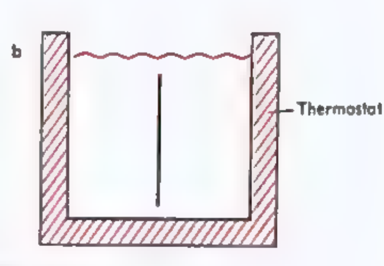
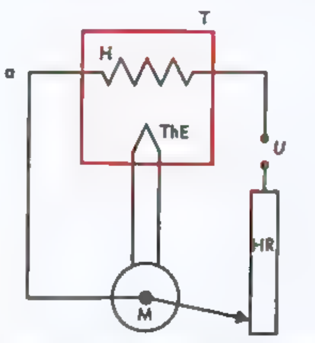


Abb. 3 Altern von Stäben a Relativmessung b Absolutmessung



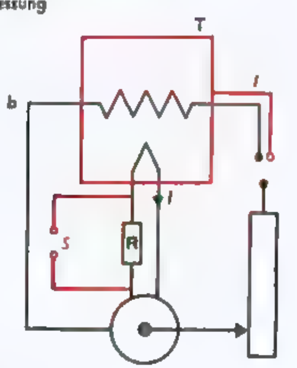


Abb. 4 a Prinzipbild eines Thermostaten
b als Regelanlage mit den Bezeichnungen der Abb. 2

MESSMETHODEN DER PHYSIK II

Beim Bestimmen der physikalischen Größe „Altern" wird nicht direkt das „Altern" gemessen, sondern die Maßgröße „Länge" (in Metern). Maßgrößen (wie Meter, Sekunde, Kilogramm, Ampere, Volt, Watt) können mit einer Direkt- oder mit einer Nullmethode bestimmt werden.

Bei den *Direktmethoden* zeigt ein beweglicher „Zeiger" auf einer Skala direkt die Meßgröße an (z. B. beim Thermometer). Bei den *Nullmethoden* wird die bestimmende Größe so lange mit einer genau bekannten und veränderbaren gleichartigen Größe verglichen, bis ein Nullinstrument den Nullabgleich anzeigt. Die Nullmethoden sind viel genauer als die Direktverfahren, nachteilig ist die lange Einstellzeit und der gewöhnlich größere Aufwand. Diesen Nachteil haben automatische Kompensationsvorrichtungen nicht, die das Gleichgewicht selbsttätig einregeln; sie sind jedoch sehr teuer. Das Meßergebnis kann bei diesen Geräten meistens registriert werden.

Abb. 1 zeigt die Prinzipschaltung einer zur Messung eines unbekannten elektrischen Widerstandes R_x verwendeten Wheatstoneschen Brücke als Grundtyp einer Nullabgleichsanordnung. Die Schaltung enthält die drei bekannten Präzisionswiderstände R_1, R_2 und R_3, von denen R_3 veränderlich ist. R_3 wird so lange verändert bis das im Diagonalzweig eingebaute Galvanometer stromlos ist. Dann gilt für die Größe des unbekannten Widerstandes R_x

$$R_x = R_3 \frac{R_2}{R_1}$$

Die Wheatstonebrücke kann auch zur Temperaturbestimmung verwendet werden, wenn der unbekannte Widerstand R_x durch ein Widerstandsthermometer R_{th} (vgl. S. 358) ersetzt wird. Zur Regulierung des durch das Thermometer fließenden Stromes wird ein Vorschaltwiderstand R eingebaut (Abb. 2).

Die Wheatstonebrücke der Abb. 2 läßt sich auf einfache Weise zum automatischen Nullabgleich einrichten. Der Abgleich erfolgt durch ein Drehpotentiometer D, das über einen Motor M vom als Schalter eingebauten Nullinstrument G verstellt werden kann. Je nach dem Vorzeichen der Brückenspannung dreht der Stellmotor M das Potentiometer, bis G den Kontakt freigibt. Zur Erhöhung der Empfindlichkeit wird zwischen G und M ein Verstärker V eingebaut. Wird durch eine Vorrichtung die Stellung von D auf Registrierpapier aufgezeichnet, dann ist das Gerät der Abb. 3 ein selbstabgleichendes Temperaturmeßgerät mit automatischer Registrierung.

Die genaueste Methode der Temperaturmessung ist die Messung der Thermospannung U_{th} eines Thermoelements ThE durch Kompensation; das Prinzip ist in Abb. 4 dargestellt. Der durch U_H verursachte Hilfsstrom i, der durch R auf einen festen Wert eingestellt wird, fließt durch die mit Abgreifkontakten A_1 und A_2 versehenen Präzisionswiderstände R_1 und R_2. Durch den Schalter S wird das Galvanometer an das Normalelement mit der Spannung U_N gelegt und R_N so lange verändert, bis G stromlos ist. Der Schalter wird dann umgelegt und durch Verstellen von A_2 die Thermospannung U_{th} kompensiert. Beträgt der Kompensationswiderstand R_{th}, dann läßt sich die Thermospannung aus

$$U_{th} = U_N \frac{R_{th}}{R_N}$$

berechnen und daraus mit der bekannten Eichkurve des Thermoelements die Temperatur.

Abb. 1 Wheatstonesche Brückenschaltung zur Widerstandsmessung

Abb. 2 Wheatstonesche Brücke als Thermometer

Abb. 3 Erweiterung zum Selbstabgleich

Abb. 4 Thermospannungsmessung durch Kompensation

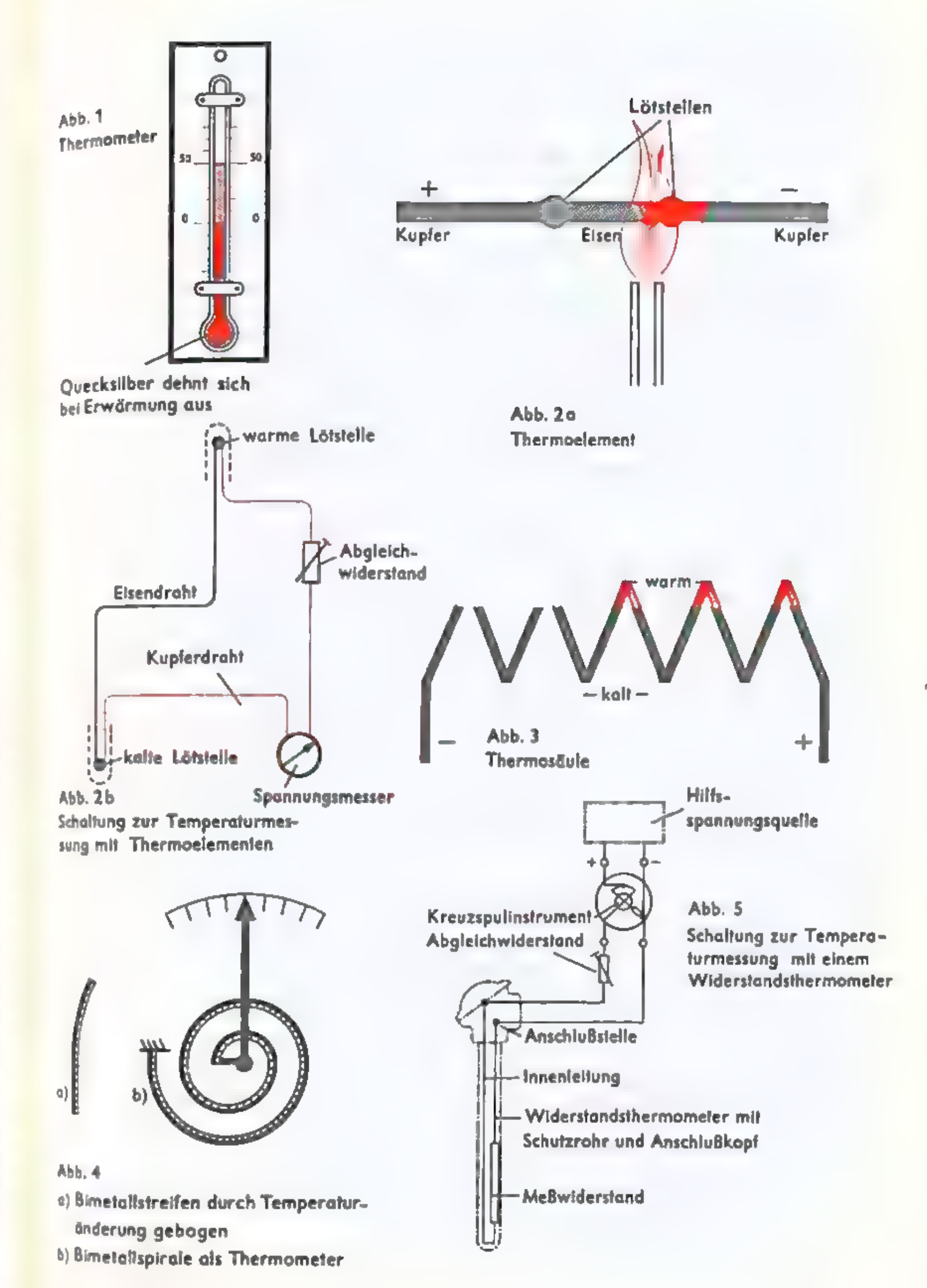
TEMPERATURMESSGERÄTE

1. Beim gewöhnlichen *Thermometer* wird die Eigenschaft der Stoffe, sich bei Temperaturerhöhung auszudehnen bzw. bei Temperaturerniedrigung zusammenzuziehen, ausgenützt. Diese Eigenschaft weisen die meisten gasförmigen, festen und flüssigen Stoffe auf.
Das gebräuchlichste Thermometer ist das Quecksilberthermometer. Es besteht aus einem Kapillarröhrchen (Röhrchen mit sehr kleinem Durchmesser), das am oberen Ende zugeschmolzen, am unteren Ende aber kugel- oder zylinderförmig erweitert ist. Diese Erweiterung ist mit Quecksilber gefüllt. Bei Erwärmung dehnt sich dieses aus und kann nur in die enge Kapillare ausweichen. Eine kleine Volumenvergrößerung bei Erwärmung hat daher schon einen merklichen Anstieg in der Kapillare zur Folge. Zur Eichung des Thermometers benützt man zwei Fixpunkte. Der untere ist der Gefrierpunkt, der obere der Siedepunkt des Wassers bei Normaldruck von 760 mm Quecksilber. Die Differenz der Höhe der Quecksilbersäule zwischen diesen beiden Punkten teilt man nach Celsius in 100 Teile und nennt einen Teil 1°C. Der Gefrierpunkt des Wassers liegt also bei 0°C, sein Siedepunkt bei 100°C. Unterhalb und oberhalb dieser Punkte trägt man die Grade in gleichen Abständen weiter auf. Andere Gradeinteilungen sind die nach Reaumur in 80 Teile (unterer Fixpunkt 0°R, oberer Fixpunkt 80°R) und die nach Fahrenheit in 180 Teile, wobei hier der Gefrierpunkt des Wassers bei 32°F und sein Siedepunkt bei 212°F liegt. Bei Thermometern, die vorwiegend zur Messung von Temperaturen weit unter 0°C verwendet werden, kann man Quecksilber als Füllung nicht benützen, da dieses schon bei −39°C erstarrt. Man füllt sie deshalb mit gefärbtem Alkohol, der einen wesentlich tieferen Gefrierpunkt hat. Die niedrigste Temperatur, die man sich theoretisch denken kann, ist der sog. absolute Nullpunkt von −273,16°C oder 0°K (0 Grad Kelvin).

2. *Thermoelement:* Lötet man zwei Drähte aus Metall oder Metallegierungen (z. B. Kupfer und Konstantan oder Kupfer und Eisen) zusammen (Abb. 2a) und hält eine Lötstelle auf konstanter Temperatur, während man die andere Lötstelle erwärmt, so entsteht zwischen den beiden Stellen eine thermoelektrische Spannung, die um so größer ist, je größer die Temperaturdifferenz an den Lötstellen ist. Diese Anordnung nennt man ein Thermoelement. Die entstandene Spannung kann an einem Voltmeter abgelesen werden (Abb. 2b). Nach Eichung des Instrumentes kann ein Thermoelement zur Messung der Temperatur verwendet werden. Die Eichung geschieht dadurch, daß man die Höhe der Spannung bei einer bekannten Temperaturdifferenz feststellt. Da die Spannung an einem Thermoelement nur wenige Millivolt beträgt, schaltet man mehrere Elemente hintereinander (Abb. 3). So entsteht eine Thermosäule (Lötstellen abwechselnd warm und kalt).

3. Beim *Widerstandsthermometer* (Abb. 5) wird die Eigenschaft der meisten Metalle ausgenützt, bei höheren Temperaturen den Strom weniger gut zu leiten als bei niedrigeren, d. h. ihren Widerstand proportional der Temperaturzunahme zu erhöhen. Der Widerstand besteht aus Platin- oder Nickeldraht und ist so bemessen, daß er bei 0°C einen Widerstand von 100 Ohm hat. Damit die von der Temperatur abhängigen veränderlichen Widerstände gemessen werden können, muß an das Widerstandsthermometer eine Hilfsspannung angelegt werden. Zur Messung dient z. B. ein Kreuzspulinstrument. Das Meßwerk spricht auf das Verhältnis der Ströme in den beiden Spulen an. Während der Strom in der einen Spule durch einen temperaturunabhängigen Widerstand konstant gehalten wird, wird der Strom in der anderen Spule vom Widerstand des Drahtes bestimmt, der der Temperatur ausgesetzt ist. Schwankungen der Spannung des Hilfsstromes beeinflussen die Meßgenauigkeit nicht, da ihr beide Spulen gleichermaßen ausgesetzt sind.

4. *Bimetallthermometer* bestehen aus zwei aufeinandergelöteten Blechstreifen aus verschiedenen Metallen, die sich bei gleicher Erwärmung verschieden stark ausdehnen. Abb. 4 zeigt die Funktionsweise eines Meßgerätes mit einer Bimetallspirale, die sich bei Erwärmung krümmt. Ein Gerät dieser Art wird vorher geeicht, indem man den Zeigerausschlag bei einer bekannten Temperatur feststellt und an der Skala anschreibt.



THERMOSTAT

Thermostate oder Temperaturregler sind Vorrichtungen, die eine gewünschte Temperatur auf konstanter Höhe halten. Sie erreichen das durch einen sog. Temperaturfühler, der die gewünschten Temperatur „erfühlt“ und Informationen über die Abweichung von der gewünschten Temperatur darüber an ein Organ weitergibt, das die Schwankung ausgleicht. Als Temperaturfühler finden u. a. mit Flüssigkeit gefüllte Rohre, Bimetallstreifen oder Federbälge Verwendung. Das einfachste Gerät ist der *unmittelbar* wirkende Thermostat. Er nutzt die Tatsache aus, daß sich fast alle Flüssigkeiten ausdehnen, wenn sie erwärmt werden (Abb. 1). Der Thermostat selbst besteht aus einem Rohr, das mit einer Flüssigkeit gefüllt ist, die sich bei Erwärmung besonders stark ausdehnt (Abb. 2). Die Verbindung zum Steuerkörper des Ventils in der Heizrohrleitung wird durch ein Kapillarrohr hergestellt, das ebenfalls mit Flüssigkeit gefüllt ist. Wird nun die Luft- und damit die Raumtemperatur höher als gewünscht, so dehnt sich die Flüssigkeit im Fühler aus, überwindet die Gegenkraft einer Feder am Ventil und drosselt oder schließt dieses. Hierdurch wird der Strom des Heizmittels verringert und damit auch die Wärmeabgabe. Dadurch sinkt nach einiger Zeit die Raumtemperatur, so daß sich die Flüssigkeit abkühlt und zusammenzieht. Die Federkraft am Ventil wird wieder größer als der Druck der Flüssigkeit, und das Ventil öffnet sich wieder. So wird die Raumtemperatur innerhalb kleiner Grenzen konstant gehalten. Die gewünschte absolute Größe der Raumtemperatur stellt man an einer Skala ein, die beim Hersteller geeicht wurde. Durch Drehung der Schraube an der Reguliervorrichtung wird die Feder am Ventil durch die Flüssigkeit mehr oder weniger zusammengedrückt und demzufolge das Ventil mehr oder weniger geöffnet. Hierdurch wird die Durchflußmenge des Heizmittels größer oder kleiner, die Raumtemperatur stellt sich höher oder niedriger ein (Abb. 2). Einen anderen Typ stellen die *mittelbar* wirkenden Thermostate dar, die zur Übertragung des Impulses, der zur Temperaturveränderung führt, Hilfsenergie (etwa elektrischen Strom oder Druckluft) benötigen. Bei diesen Geräten betätigt der Fühler einen Kontakt, d. h., er schließt einen Stromkreis (Abb. 3). Dadurch werden die Regelorgane der Heizung betätigt (ein Ventil wird z. B. durch einen Elektromagneten geöffnet oder geschlossen). Verwendet man beispielsweise den oben beschriebenen, mit Flüssigkeit gefüllten Ausdehnungsfühler, so schließt die sich bei steigender Temperatur ausdehnende Flüssigkeit den Kontakt. Das Ventil erhält dann durch den elektrischen Strom den Befehl zum Schließen. Bei Abkühlung läuft der Vorgang entsprechend gegenläufig ab. Wenn dann die eingestellte Mindesttemperatur erreicht ist, die Flüssigkeit sich also bis zu einem gewissen Grad zusammengezogen hat, wird der Stromkreis geöffnet, so daß der Elektromagnet das Ventil nicht mehr in der Schließstellung festhalten kann und dem Heizmittel der Weg freigegeben wird.
Als Fühler verwendet man neben den mit Flüssigkeit gefüllten noch sog. Bimetallfühler (Abb. 4a). Das sind zusammengefügte dünne Streifen zweier verschiedener Metalle, die sich bei Erwärmung verschieden stark ausdehnen. An einem Ende ist dieser Bimetallstreifen befestigt. Steigt nun die Temperatur, so dehnt sich ein Metall stark, das andere nur schwach aus. Damit krümmt sich der Bimetallstreifen und kann mit seinem freien Ende den Kontakt betätigen (Abb. 4b).
Die dritte Art der Fühler sind Bälge, die mit einer leicht verdampfenden Flüssigkeit oder einem Gas gefüllt sind (Abb. 4c). Steigt hier die Temperatur, so führt die Volumenvergrößerung der Balgfüllung zu einer Ausdehnung des Balgs, wodurch ein Kontakt betätigt wird. Bei sinkender Temperatur zieht sich der aus federndem Material gefertigte Balg infolge der Volumenverkleinerung seiner Füllung wieder zusammen, wodurch ein anderer Kontakt geschlossen wird.



Abb. 1 Grundlage der Thermostatsteuerung

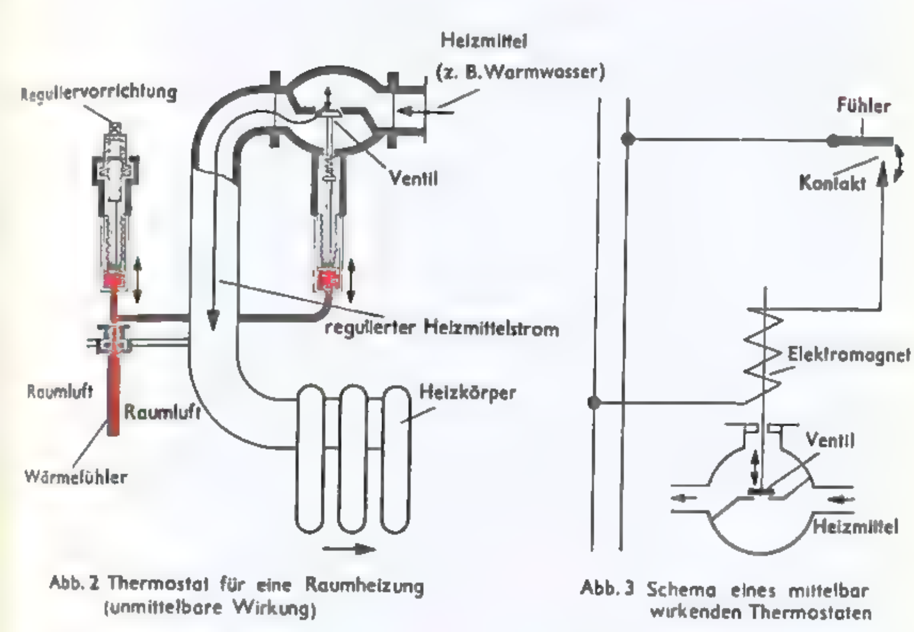


Abb. 2 Thermostat für eine Raumheizung (unmittelbare Wirkung)

Abb. 3 Schema eines mittelbar wirkenden Thermostaten

Kontakte
Einstellung
Bimetall
bei Erwärmung

Abb. 4a Bimetallfühler Abb. 4b Prinzip des Bimetallstreifens Abb. 4c Balgfühler

RECHENSTAB I

Überall, wo es gilt, Multiplikations- und Divisionsaufgaben rasch durchzuführen und die erforderliche Genauigkeit nicht mehr als drei bis vier Stellen beträgt, wird der Rechenstab verwendet; er ermöglicht darüber hinaus aber auch das Potenzieren und Radizieren sowie (bei der verbreitetsten Form) das Rechnen mit trigonometrischen Funktionen (Sinus, Kosinus, Tangens und Kotangens). Gemäß den verschiedenen Verwendungsmöglichkeiten in den Naturwissenschaften, in der Technik und im kaufmännischen Bereich gibt es eine Vielzahl von speziellen Ausführungsformen, denen jedoch allen das gleiche Prinzip zugrunde liegt: die *logarithmische Teilung*. Um sie zu verstehen, betrachten wir zunächst gewöhnliche Potenzen, d. h. Produkte aus gleichen Faktoren:

$$2 \cdot 2 = 2^2, \quad 2 \cdot 2 \cdot 2 = 2^3, \quad 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 2^4, \quad 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 2^5, \ldots$$

Im folgenden werden wir nur die Grundzahl (die sogenannte *Basis*) 10 verwenden, als Hochzahlen (sogenannte *Exponenten*) alle Zahlen von Null aufwärts. – Man multipliziert Potenzen mit gleicher Basis, indem man ihre Exponenten addiert; z. B. $10^3 \cdot 10^5 = 10^{3+5} = 10^8$, denn

$$10^3 = 10 \cdot 10 \cdot 10, \quad 10^5 = 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10, \text{ also:}$$

$$10^3 \cdot 10^5 = 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 = 10^8;$$

man dividiert sie, indem man die Exponenten subtrahiert, also

$$10^5 : 10^3 = 10^{5-3} = 10^2,$$

$$\text{denn: } 10^5 : 10^3 = \frac{10^5}{10^3} = \frac{10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10}{10 \cdot 10 \cdot 10} = 10 \cdot 10 = 10^2.$$

In Tabelle 1 sind die Potenzen von 10 mit ganzzahligen Exponenten zusammengestellt. Die Zahlen zwischen 1 und 10 lassen sich nun (dies soll hier nicht näher begründet werden) durch Zehnerpotenzen mit *nicht* ganzzahligen Exponenten darstellen (vgl. Tab. 2). Es handelt sich dabei stets um unendliche, nichtperiodische Dezimalzahlen, von denen in Tab. 2 jeweils nur die ersten drei Stellen angeführt sind. Man bezeichnet diese Exponenten als die *Logarithmen* (Abkürzung $\log_{10}$ oder lg) der Zahlen zur Basis 10, die Zahlen selbst als *Numeri*. Damit kann man schreiben:

$$\lg 1 = 0; \quad \lg 2 = 0{,}301; \quad \lg 3 = 0{,}477 \text{ usw.}; \quad \lg 10 = 1{,}000.$$

Da $\lg(10a) = 1 + \lg a$ ist, lassen sich Zahlen, die größer als 10 sind, mit Hilfe der gleichen Logarithmen – genauer: der gleichen hinter dem Komma stehenden Zahlen, der sogenannten *Mantissen* der Logarithmen – darstellen:

$$20 = 10 \cdot 2, \ \lg 20 = \lg(10 \cdot 2) = \lg 10 + \lg 2 = 1 + 0{,}301 = 1{,}301;$$

$$200 = 10^2 \cdot 2, \ \lg 200 = \lg(100 \cdot 2) = \lg 100 + \lg 2 = 2 + 0{,}301 = 2{,}301.$$

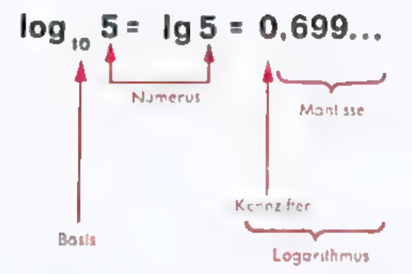
Die Stelle(n) vor dem Komma bezeichnet man als die *Kennziffer(n)* des Logarithmus. Die Multiplikation bzw. Division von Zahlen läßt sich also auf die Addition bzw. Subtraktion von Exponenten (Logarithmen) zurückführen. Diese Tatsache wird beim Rechenstab ausgenutzt, denn eine Addition bzw. Subtraktion läßt sich mechanisch durch das Aneinandersetzen entsprechend langer Strecken ausführen, d. h. Strecken, deren Länge den Logarithmen bzw. Mantissen entsprechen. Eine Skala, die in derartige Strecken unterteilt ist, bezeichnet man als *logarithmische Skala* (vgl. Abb. 1). Am Skalenanfang steht die Zahl 1 ($\lg 1 = 0$), die Markierung einer beliebigen

Tabelle 1

Potenz	Exponent	Wert der Potenz
10^0	0	1
10^1	1	10
10^2	2	100
10^3	3	1000
10^4	4	10000
10^5	5	100000
10^6	6	1000000
...	...	......

Tabelle 2

Zahl Numerus	Potenz	Exponent (Logarithmus)
1	10^0	0
2	$10^{0,301}$...	0,301...
3	$10^{0,477}$...	0,477...
4	$10^{0,602}$...	0,602...
5	$10^{0,699}$...	0,699...
6	$10^{0,778}$...	0,778...
7	$10^{0,845}$...	0,845...
...	...	......



$$\log_{10} 50 = \lg 50 = 1{,}699\ldots$$

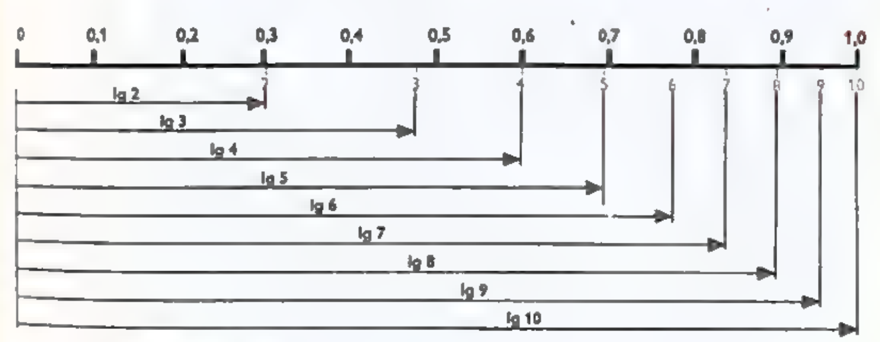


Abb. 1 Die logarithmische Skala

zwischen 1 und 10 gelegenen Zahl a hat von diesem Anfangspunkt den Abstand lg a. Die Skalenteilungen für die Zahlen 10 bis 100, 100 bis 1 000 usw. sind nach dem oben Gesagten die gleichen wie für die zwischen 1 und 10 gelegenen Zahlen, man kann also *einen* solchen Abschnitt zur Darstellung der gesamten (eigentlich unendlich langen) logarithmischen Skala verwenden; Zahlen, die sich nur um einen Faktor 10^n (also eine beliebige Potenz von 10) unterscheiden, entsprechen dann derselben Markierung. Hierauf ist beim Rechnen mit dem Rechenstab stets zu achten (d. h. die „Kommastellung" ist durch eine grobe Überschlagsrechnung bzw. Abschätzung gesondert zu ermitteln).
Ein gewöhnlicher Rechenstab besteht aus dem Stabkörper, dem Schieber (Zunge) und dem durchsichtigen Läufer mit einem oder mehreren Einstellstrichen (Abb. 2). Er ist meist 25 cm lang (Skalenlänge), daneben werden jedoch auch Rechenstäbe von 12,5 cm (Taschenrechenstäbe) oder 50 cm Länge verwendet. – Sowohl auf dem Stabkörper als auch auf dem Schieber befinden sich mehrere logarithmische Skalen. In der Nullstellung des Stabes stehen sich die jeweils gleich geteilten „Hauptskalen" A und B bzw. C und D gegenüber (jeweils an der Trennfuge zwischen Stabkörper und Schieber; vgl. Abb. 2). Die Teilung der Skalen A und B läuft von 1 bis 100, die der Skalen C und D von 1 bis 10. Das bedeutet, daß man zu jeder Zahl der Skala C bzw. D die Quadratzahl ermitteln kann: Man schiebt den Einstellstrich des Läufers auf die Markierung der betreffenden Zahl und liest auf B bzw. A die Quadratzahl ab (Abb. 3). Auf dem umgekehrten Wege erhält man die Quadratwurzel (Abb. 4).
Zum Multiplizieren verwendet man (wegen der größeren Ablesegenauigkeit) meist die Skalen C und D (Abb. 5). – Beim Rechnen mit diesen Skalen kommt es vor, daß der Schieber so weit über den Stabkörper hinausreicht, daß ein Ablesen des Ergebnisses nicht mehr möglich ist. In einem solchen Falle wird er so weit nach links geschoben, bis anstelle der 1 die 10 über dem ersten Faktor steht. Man liest dann wie üblich unter dem zweiten Faktor der Skala C das Ergebnis auf der Skala D ab (Abb. 6). Ein solches „Durchschieben" läßt sich vermeiden, wenn man die Skalen A und B benutzt (Nachteil: geringere Ablesegenauigkeit). – Die Durchführung der Division (als Subtraktion von Logarithmen) wird in den Abb. 7 und 8 gezeigt. Ebenso wie bei der Multiplikation kann man natürlich auch bei der Division die Skalen A und B benutzen. – Aufgaben, in denen sowohl Multiplikation als auch Division vorkommen, löst man nach dem Schema der Abb. 9.
Zwischen den Skalen B und C des Schiebers befindet sich (beim Normalrechenstab) die sogenannte Reziprokskala CI. Ihre Unterteilung entspricht der der Skalen C und D, doch verläuft sie von rechts nach links. Auf dieser Skala kann man die Reziprokwerte (Kehrwerte) der auf C angegebenen Zahlen aufsuchen (Abb. 10). Geht man von der Reziprokskala CI aus, so findet man auf der Skala B die reziproken Werte der Quadrate. Geht man andererseits von einem Wert a auf der Skala B aus, so findet man darunter auf der Reziprokskala CI den Wert $1/\sqrt{a}$. – Auch beim Multiplizieren (als Dividieren mit dem reziproken Wert) läßt sich die Reziprokskala mit Vorteil verwenden, ebenso bei komplizierten Multiplikations- und Divisionsaufgaben (Produkte aus mehreren Faktoren, Abb. 11, zusammengesetzte Multiplikations- und Divisionsaufgaben). – Die über der Skala A angebrachte Skala K läuft von 1 bis 1000. Mit ihr lassen sich (durch Übergang von D nach K) die Kubikzahlen der auf D eingestellten Werte finden (Abb. 3), auf umgekehrtem Wege die Kubikwurzeln (Abb. 4).

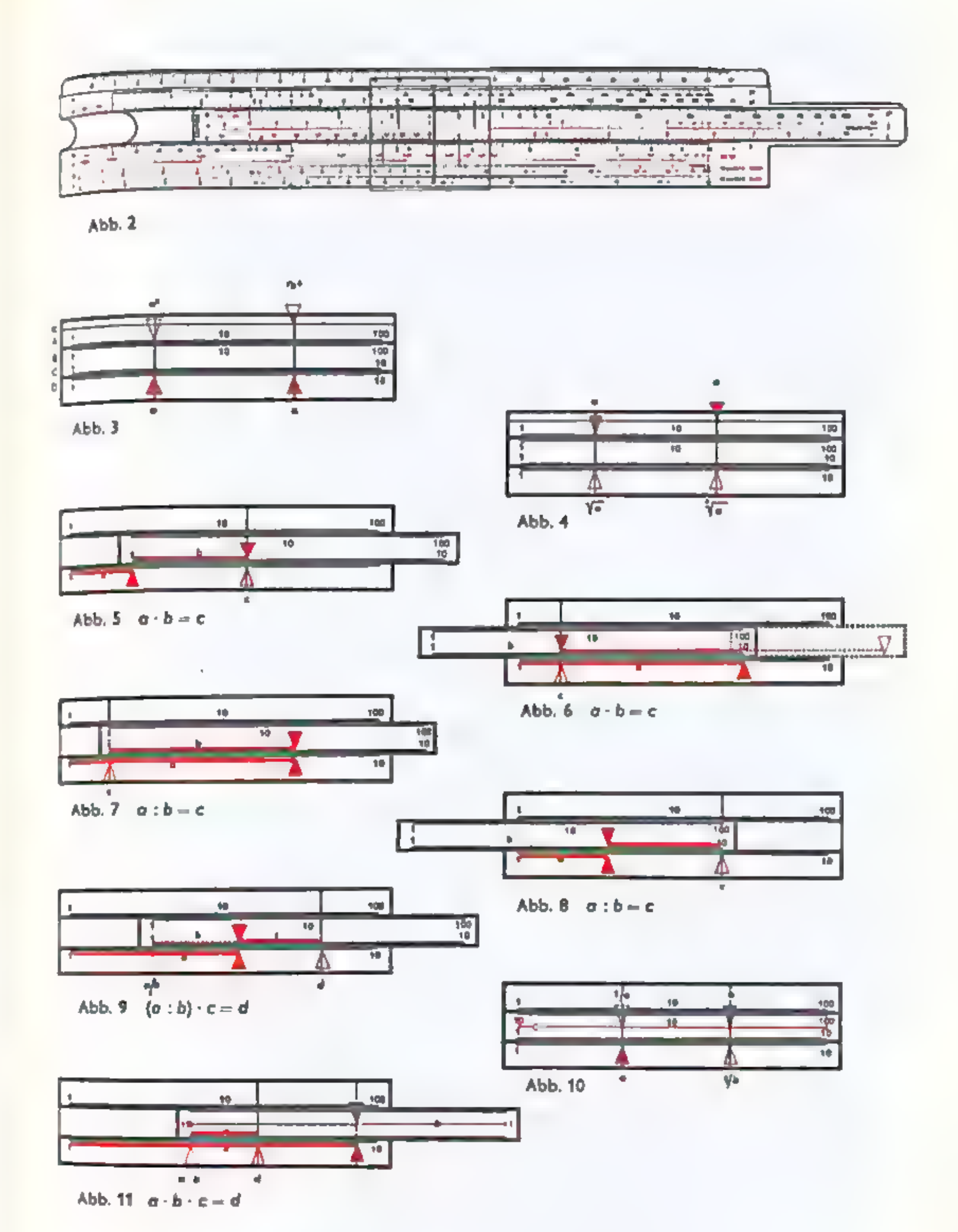


Abb. 2

Abb. 3

Abb. 4

Abb. 5 $a \cdot b = c$

Abb. 6 $a \cdot b = c$

Abb. 7 $a : b = c$

Abb. 8 $a : b = c$

Abb. 9 $(a : b) \cdot c = d$

Abb. 10

Abb. 11 $a \cdot b \cdot c = d$

DRUCKMESSUNG 1

Als Druck bezeichnet man den Spannungszustand flüssiger und gasförmiger Körper. Er wird als Kraft definiert, die senkrecht und gleichmäßig auf eine Fläche einwirkt. Für die Praxis ist es ausreichend, den Unterschied zwischen dem Druck eines Gases oder einer Flüssigkeit und dem atmosphärischen Druck, auch Bezugsdruck genannt, zu kennen. Der gemessene Unterschied wird als relativer Druck bezeichnet. Den absoluten Druck – bezogen auf das absolute Vakuum – erhält man, wenn man bei Überdruckmessungen den gemessenen Druck und den Bezugsdruck addiert, bei Unterdruckmessungen den gemessenen Druck vom Bezugsdruck subtrahiert. Die Zusammenhänge veranschaulicht Abb. 1.

Das im Aufbau einfachste Druckmeßgerät ist das U-Rohr-Manometer (Abb. 2). Es kann entweder als beidseitig offenes Rohr (a) oder als Vakuummeßgerät (b) mit einseitig abgeschlossenem und bis auf den Dampfdruck der Sperrflüssigkeit evakuiertem Schenkel verwendet werden. Bei Über- oder Unterdruckmessungen mit Form a wirkt der atmosphärische Druck als Bezugsdruck p_b auf den einen, der zu messende Druck p_1 auf den anderen Schenkel. Der Höhenunterschied H (mm Sperrflüssigkeitssäule) ist direkt proportional der Druckdifferenz: $H = (p_1 - p_b)/\gamma s$; γ_s = spezifisches Gewicht der Sperrflüssigkeit. Bei Differenzdruckmessungen wird der Druck eines Gases oder einer Flüssigkeit vor einem Strömungswiderstand in einer Rohrleitung auf den einen, der Druck nach dem Strömungswiderstand (anstelle des Bezugsdrucks p_b) auf den anderen Schenkel geleitet. Form c zeigt ein umgekehrtes U-Rohr-Manometer; es ermöglicht bei Flüssigkeiten das unmittelbare Messen der Druckdifferenz in mm Flüssigkeitssäule.

Eine Kombination von U-Rohr-Manometer und Waage ist die Ringwaage (Abb. 3), die besonders für Differenzdruckmessungen geeignet ist. Auf die Trennwand wirkt die Druckdifferenz $p_1 - p_2$. Multipliziert mit dem Querschnitt A und dem mittleren Radius R ergibt sich ein Drehmoment $M_P = (p_1 - p_2) \cdot A \cdot R$. Diesem Drehmoment entgegen wirkt das Drehmoment $M_G = G \cdot \sin\alpha \cdot a$, wobei die Trennwand bei $M_P = M_G$ in einem bestimmten Winkel α zur Senkrechten liegt. Der Winkel α ist dem Differenzdruck direkt proportional.

Eine für die Druckmessung wichtige Rolle spielen die sogenannten Federmanometer. Das Meßprinzip beruht darauf, daß sich unter dem Einfluß des Druckes ein elastisches Meßglied verformt. Diese Verformung wird durch einen Übertragungsmechanismus in eine drehende Bewegung des Zeigers umgewandelt. Sie können für Über- und Unterdruckmessungen, aber auch zur Messung von Differenzdrücken verwendet werden. Das Rohrfedermanometer (Abb. 4), hat hier weiteste Verbreitung gefunden. Das elastische Meßglied besteht aus einem kreisförmigen, am Ende verschlossenen Hohlrohr von ovalem oder elliptischem Querschnitt. Wird der Innenraum des Rohres dem Meßdruck ausgesetzt, so vergrößert sich die Krümmung und das Rohr windet sich etwas auf (Bourdon-Effekt). Auch der Querschnitt des Rohres verändert sich. Bei Unterdruckmessung bewegt sich die Feder in der entgegengesetzten Richtung. Das Plattenfedermanometer (Abb. 5), weist als Meßglied eine zwischen Flanschen eingespannte Plattenfeder, das Kapselfedermanometer (Abb. 6) eine aus 2 Membranen gebildete, geschlossene Kapsel auf. Bei Einwirkung eines Drucks biegen sich Platten- bzw. Kapselfeder durch.

Das Meßprinzip des Kolbenmanometers (Abb. 7) besteht darin, daß dem zu messenden Druck durch Ändern des Gewichts ein gleich großer Gegendruck entgegengesetzt wird. Kolbenmanometer sind sehr genaue Geräte, sie werden deshalb oft zur Eichung anderer Druckmeßgeräte verwendet.

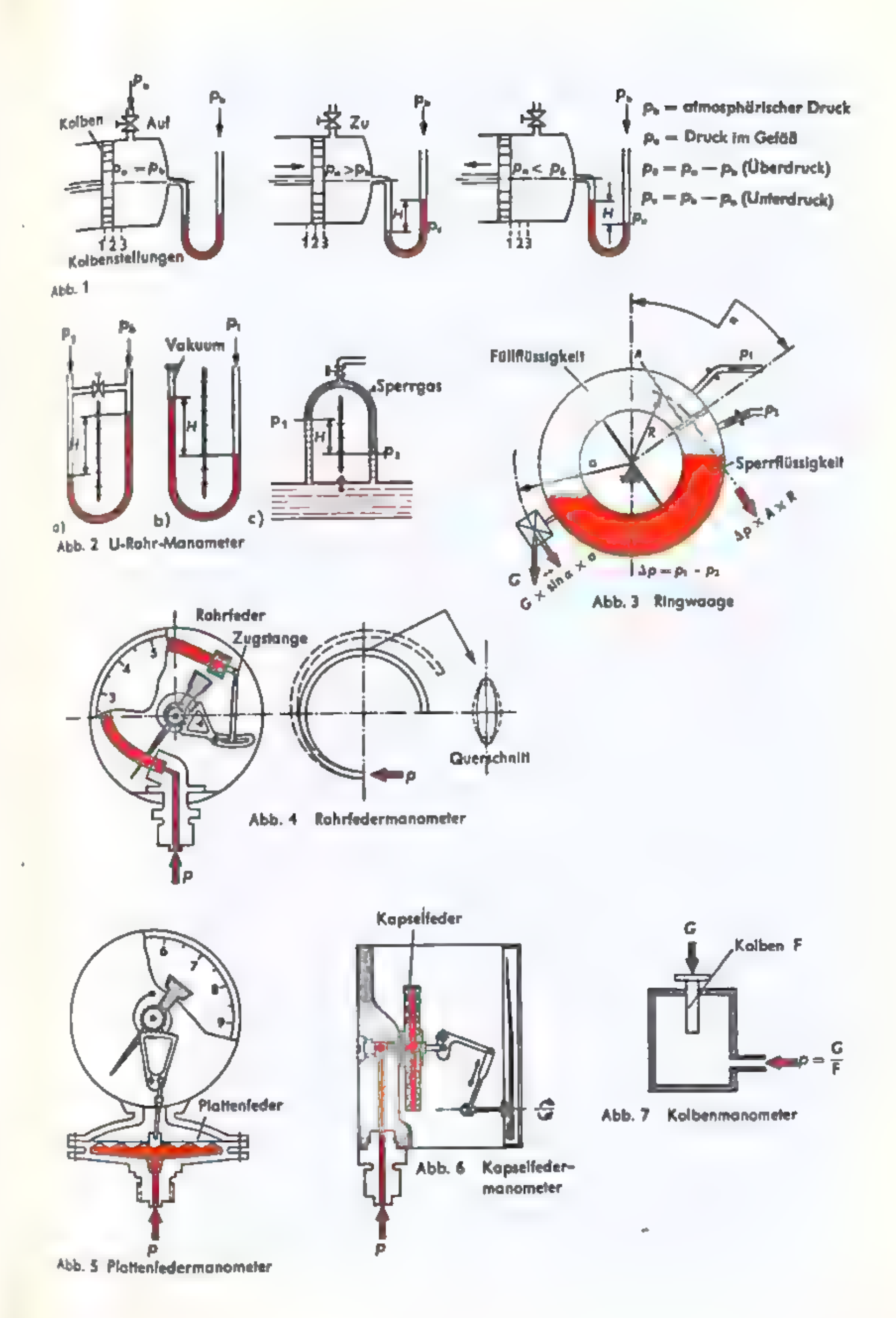


Abb. 1

Abb. 2 U-Rohr-Manometer

Abb. 3 Ringwaage

Abb. 4 Rohrfedermanometer

Abb. 5 Plattenfedermanometer

Abb. 6 Kapselfedermanometer

Abb. 7 Kolbenmanometer

DRUCKMESSUNG II

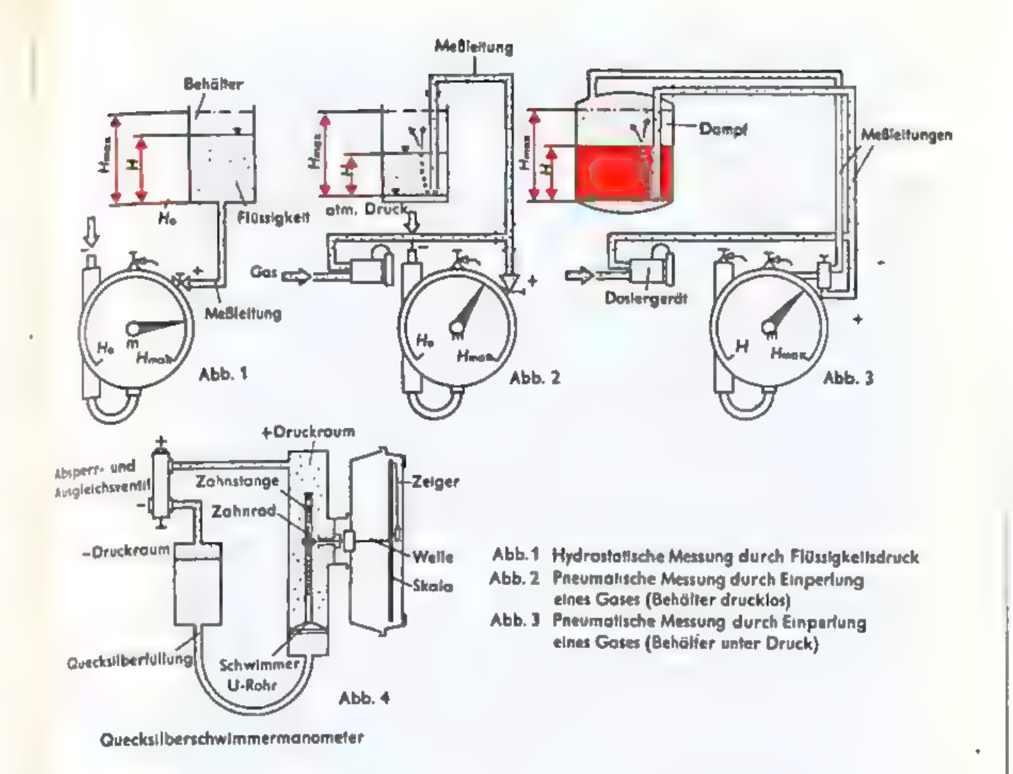
Auf einem ganz anderen Prinzip beruht die Wirkungsweise der elektrischen Manometer. Bei diesen Geräten ändern sich unter dem Druck die elektrischen Eigenschaften von Stoffen, wie beispielsweise der Widerstand bei Manganin, Kohle u. a. Diese Geräte werden Widerstandsmanometer genannt. Andere Stoffe, z. B. Quarz, laden sich durch Einwirkung des Drucks auf. Manometer, die auf dem Prinzip der elektrischen Aufladung des Quarzes beruhen, nennt man piezoelektrische Manometer. Manometer, bei denen sich die Kapazität eingebauter Kondensatoren unter der Einwirkung des Drucks ändert, bezeichnet man als kapazitive Manometer.

Gemessene Drücke lassen sich nicht nur auf vorbeschriebene Weise elektrisch abgreifen und auf elektrische Anzeige- oder Schreibgeräte fernübertragen, sondern auch mittels an Manometer angebauter Fernsender. Weitere Anwendungsgebiete für Manometer sind die Höhenstands- und Durchflußmeßtechnik.

Die Abb. 1, 2 und 3 zeigen Beispiele aus der Höhenstandsmeßtechnik. Bei der Anlage nach Abb. 1 wird der hydrostatische Druck der Flüssigkeit bzw. deren Höhe von einem Quecksilber-Schwimmermanometer (Abb. 4) angezeigt. Dieses Gerät entspricht im Aufbau einem U-Rohr-Manometer mit Quecksilber als Sperrflüssigkeit. Der Plusdruckraum wird durch den veränderlichen Flüssigkeitsdruck, der Minusdruckraum durch den Atmosphärendruck beaufschlagt. Der Hub des auf dem Quecksilberspiegel aufgesetzten Schwimmers ist dem Flüssigkeitsstand verhältnisgleich. Er wird über Zahnstange und Zahnrad in eine Drehbewegung umgeformt und auf den Zeiger übertragen. Eine andere Methode zeigt Abb. 2. Unter Druck wird Gas (Luft, Stickstoff, Kohlensäure) in die Meßleitung eingeführt, so daß es aus der Tauchrohrmündung ständig in Blasen austritt. Der Gasdurchfluß wird durch ein Dosiergerät konstant gehalten. Das Gas in der Meßleitung nimmt den Druck an, welcher der Höhe des jeweiligen Flüssigkeitsstandes entspricht. Dieser Druck wird auf das Schwimmermanometer übertragen. Bei einem unter Druck stehenden Behälter (Abb. 3) nimmt das Gas den Druck der Höhe des Flüssigkeitsstandes zuzüglich des Drucks des über dem Flüssigkeitsspiegel vorhandenen Sattdampfes an. Der Sattdampfdruck muß deshalb kompensiert, das heißt unwirksam gemacht werden. Er wird in den Minusdruckraum geleitet, so daß das Schwimmermanometer lediglich den Flüssigkeitsdruck bzw. die Höhe der Flüssigkeit anzeigt.

Die aus der Bernoullischen Gleichung und der Kontinuitätsgleichung (vergleiche S. 18) gewonnenen Erkenntnisse werden für die Durchflußmeßtechnik mit Drosselgeräten benutzt. Sie besagen, daß die Differenz der vor und nach einem Drosselgerät gemessenen Drücke ein Maß für den Durchfluß ist. Diese Druckdifferenz wird als Wirkdruck b bezeichnet. Die Gleichung lautet: $Q(\mathrm{m^3/h}) = C\sqrt{b}$, wobei C eine auf dem Typenschild des Meßgeräts angegebene Konstante und b der Wirkdruck in mmWS ist. Man erkennt die quadratische Abhängigkeit des Wirkdrucks vom Durchfluß. Wird ein Schwimmermanometer nach Abb. 4 als Meßgerät benutzt, ist die Skalenteilung nicht linear, sondern quadratisch. Durch entsprechende Formgebung der Gefäße für die Sperrflüssigkeit erreicht man, daß der Hub des Schwimmers proportional der Wurzel aus dem Wirkdruck b ist. Die Skalenteilung ist linear. Man bezeichnet solche Geräte als Schwimmermanometer mit Gefäßradizierung (Abb. 5).

Eine Durchflußmeßanlage nach dem Wirkdruckprinzip mit Drosselgerät und U-Rohr-Manometer als Kontrollgerät für das Schwimmermanometer zeigt Abb. 6. Gemessen wird beispielsweise der Durchfluß von Kaltwasser, spezifisches Gewicht $\gamma_0 = 1\ \mathrm{kp/dm^3}$. Am U-Rohr-Manometer wird ein Wirkdruck $b = 231{,}5$ mmQS abgelesen. Die Berechnung des Wirkdrucks b in mmWS erfolgt nach der Gleichung: $b\,(\mathrm{mmWS}) = (P_1 - P_2) \times (\gamma_s - \gamma_0)$ und ergibt 2905 mmWS; γ_s = spezifisches Gewicht des Quecksilbers = 13,55 kp/dm^3. $p_1 - p_2$ = Ausschlag am U-Rohr-Manometer. Der Durchfluß errechnet sich mit $Q(\mathrm{m^3/h}) = C\sqrt{b}\,(\mathrm{mmWS}) = 277\ \mathrm{m^3/h}$, der vom Schwimmermanometer angezeigt wird. Die Konstante C wurde nach den VDI-Durchflußregeln mit 5,14 ermittelt.



Quecksilberschwimmermanometer

Abb. 1 Hydrostatische Messung durch Flüssigkeitsdruck
Abb. 2 Pneumatische Messung durch Einperlung eines Gases (Behälter drucklos)
Abb. 3 Pneumatische Messung durch Einperlung eines Gases (Behälter unter Druck)

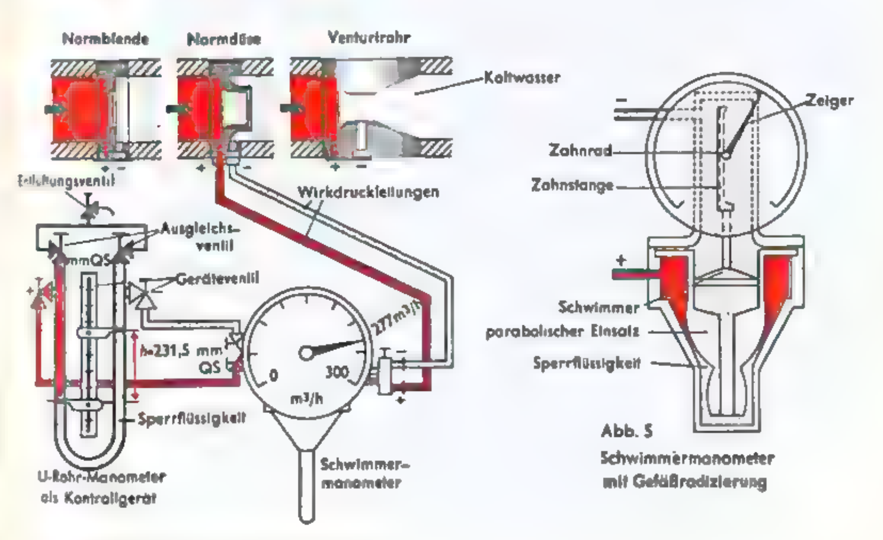


Abb. 5 Schwimmermanometer mit Gefäßradizierung

Abb. 6 Durchflußmeßanlage (Wirkdruckprinzip)

REGELUNGSTECHNIK I

Die Regelungstechnik befaßt sich mit der Regelung technischer Vorgänge. Die Regelung soll bestimmte physikalische Größen, wie Temperatur, Druck, Flüssigkeitsstand u. a., auf einen vorgegebenen Wert bringen und diesen Wert unbeschadet der äußeren Einflüsse einhalten. Im Gegensatz zur Steuerung kontrolliert die Regelung das Ergebnis ihrer Verstellung durch fortwährende Messung und korrigiert sich, wenn erforderlich. Von der Regelung spricht man nur dann, wenn ein geschlossener Wirkungskreis, Regelkreis, gebildet ist.

Eine einfache Regelung des Flüssigkeitsstandes zeigt Abb. 1. Ein Schwimmer stellt als Meßgerät den Flüssigkeitsstand, den Istwert X_i, fest. Der Schwimmer ist mit einem drehbar gelagerten Gestänge, Regler, verbunden und verschiebt den in der Zulaufleitung angeordneten Schieber des Ventiles. In Abb. 1 entspricht der Flüssigkeitsstand (Regelgröße) dem vorgegebenen Wert, dem Sollwert X_s. Als äußerer Einfluß kann z. B. eine Druckänderung in Zu- oder Ablauf (Störgröße Z_z oder Z_A) die zu- oder ablaufende Wassermenge verändern. Die Folge ist ein Ansteigen des Flüssigkeitsspiegels. Die Differenz zwischen Ist- und Sollwert nennt man die Regelabweichung X_w. Infolge des ansteigenden Flüssigkeitsspiegels wird der Schwimmer angehoben, der Schieber des Ventiles über den drehbaren Hebel tiefer in das Rohr bewegt und der Durchfluß gedrosselt. Die Stellung des Ventilschiebers gibt die Stellgröße an. Sinkt der Wasserspiegel wieder, so zieht der absinkende Schwimmer den Ventilschieber etwas mehr aus dem Rohr und vergrößert damit die Stellgröße Y und damit den Durchfluß. Als Regelstrecke ist der Behälter zu verstehen, in dem die Regelgröße, der Flüssigkeitsstand, beeinflußt wird, sowie die Zulaufleitung mit Ventil.

Will man einen anderen Flüssigkeitsstand geregelt haben, so ist der Sollwert X_s zu verstellen. Hierzu kann in Abb. 2 durch eine einfache Spindel der Abstand L verändert werden, wodurch der Schwimmer über den Hebel und Ventilschieber einen anderen Flüssigkeitsstand einregelt. Eine Größe, die wie hier über die Änderung der Länge L der Schwimmerstange den Sollwert X_s verändert, nennt man in der Regelungstechnik die Führungsgröße W.

Die Wirkungsrichtung des Regelkreises (Abb. 3) geht vom Flüssigkeitsstand über Schwimmer, Schwimmerstange zu dem als Regler wirkenden Hebel und von dort zu dem als Stellglied bezeichneten Ventil. Dieses beeinflußt den Durchfluß und damit den Flüssigkeitsstand im Behälter. Der Wirkungsweg ist, wie bei Regelungen üblich, geschlossen. Regelkreise werden üblicherweise durch ein Blockschaltbild dargestellt. Dabei werden die Regelstrecke S und der Regler R jeweils als rechteckige Kästchen gezeichnet (Abb. 4). Die beiden Kästchen (Blöcke) sind über Linien verbunden. Am Regler meldet das Eingangssignal X_0 die Regelgröße, z. B. in Abb. 3 den Flüssigkeitsstand. Der Regler vergleicht den Istwert X_i mit dem vorgegebenen Sollwert X_s. Er veranlaßt ein Ausgangssignal, die Stellgröße Y_0. Die Stellgröße Y_0 tritt in die Regelstrecke ein und bewirkt die Verstellung des Ventilschiebers auf die Stellung — Stellgröße Y_0. Die Regelstrecke verläßt das Ausgangssignal X_0, der Flüssigkeitsstand. Die Störgröße Z, z. B. eine Druckschwankung im Zu- oder Abfluß der in den Abbildungen 1—3 gezeigten Standregelung, wirkt auf die Regelstrecke ein. Die Führungsgröße W verändert im Regler den Sollwert X_s.

Die zeitlichen Veränderungen in einer Regelstrecke, das dynamische Verhalten, läßt sich anschaulich darstellen, wenn man die Stellgröße Y sprunghaft verändert, den zeitlichen Verlauf des Istwertes X beobachtet und über der Zeit aufträgt (Abb. 5). Diese Kurven zeigen an, wie die Regelstrecke von einem eingestellten Gleichgewicht in ein anderes übergeht. Man nennt diese Kurven Übergangsfunktion. Bei der Kurve *a* folgt der Istwert X verzögerungsfrei der sprunghaften Änderung der Stellgröße Y. Bei der Regelung von Durchflüssen tritt vielfach dieses Verhalten auf.

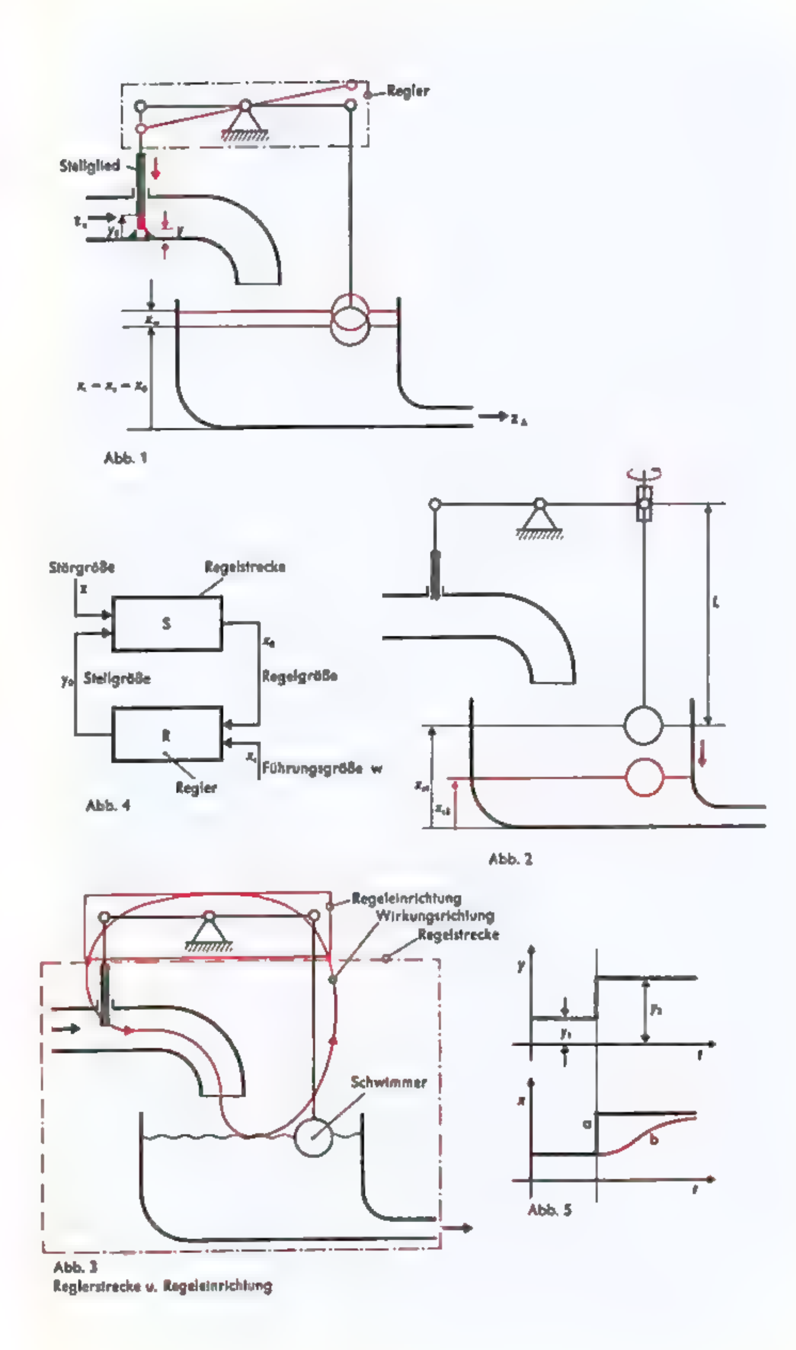


Abb. 3
Reglerstrecke u. Regeleinrichtung

REGELUNGSTECHNIK II

Ein Regelkreis besteht aus dem Meßgerät, das die physikalische Größe bestimmt, aus dem Meßumformer (Transmitter), der die Übertragung des Meßergebnisses und die Erzeugung einer genormten Eingangsgröße für den Regler bewirkt, aus dem Regler und aus dem Stellglied (Abb. 1).

Regler: Der Regler vergleicht die vom Meßgerät und Meßumformer eingehende Regelgröße X mit dem von der Führungsgröße W festgelegten Sollwert X_s. Bei einer Abweichung der Regelgröße X, z. B. Füllhöhe, von dem festgelegten Sollwert, wird daraus die Stellgröße Y gebildet, die der Regler entsprechend verstärkt, so daß der Stellantrieb des Stellgliedes ausreichend Energie zum Einstellen der Stellgröße Y erhält. Man unterscheidet stetige und unstetige Regler sowie Regler mit und ohne Hilfsenergie.

Der stetige Regler wandelt jeden eingehenden Wert der Regelgröße X in einen entsprechenden auslaufenden Wert der Stellgröße Y um. Der einfachste stetige Regler antwortet auf jede Regelabweichung X_W mit einer proportionalen (verhältnisgleichen) Änderung der Stellgröße Y (Abb. 2). Das Hebelverhältnis kennzeichnet die Übersetzung oder Verstärkung zwischen Regelabweichung X_W und Änderung der Stellgröße Y. $Y = \frac{L_2}{L_1} \cdot X_W = C_1 \cdot X_W$.

Der Regler wird nach dieser Gleichung *Proportional-* oder *P-Regler* genannt. Steigt der Druck in der Zuflußleitung infolge einer Störgröße Z an, so wird bei gleicher Öffnung des Ventils die Zuflußmenge zunehmen und der Füllstand ansteigen. Der angehobene Schwimmer schließt das Ventil etwas, so daß eine geringe Flüssigkeitsmenge zufließt. Der Flüssigkeitsspiegel steigt nicht weiter an, bleibt aber über dem Sollwert. Ein P-Regler kann daher eine Regelabweichung nicht beseitigen. Durch Erhöhung der Empfindlichkeit des Reglers läßt sich die Abweichung des Sollwerts verringern. Hierzu wird durch Verschieben des Hebeldrehpunktes D das Hebelarmverhältnis $\frac{L_2}{L_1} = C_1$ vergrößert. Dadurch bedingt eine kleine Regelabweichung eine größere Veränderung der Stellgröße Y. C_1 läßt sich jedoch nicht beliebig vergrößern, da sonst das System durch ständige Änderungen instabil wird. Bei einem vorgegebenen größtmöglichen Stellbereich Y_H des Ventils gibt es je nach Lage des Drehpunktes D ein Bereich der Regelgröße X, in dem der Regler proportional arbeitet. Dies ist der Proportionalbereich X_p (Abb. 2). Eine sprunghafte Änderung der Regelabweichung X_W hat eine verzögerungsfreie Veränderung der Stellgröße Y zur Folge (Abb. 3 b).

Der *Integralregler* oder *I-Regler* reagiert auf jede Abweichung des Ist- vom Sollwert, also auf jede Regelabweichung X_W, mit einer bestimmten Änderungsgeschwindigkeit der Stellgröße Y. Solange eine Regelabweichung besteht, ist also das Stellglied (z. B. das Ventil) ständig in Bewegung und verändert die Regelgröße, den Istwert X_i, solange bis dieser mit dem Sollwert X_s übereinstimmt. Ist die Regelabweichung $X_W = 0$, dann ist die Stellgeschwindigkeit 0 und das Stellglied in Ruhe. Bei der Flüssigkeitsstandregelung (Abb. 4) ist anstelle des mechanischen Reglers ein hydraulischer Regler getreten. Stimmen Ist- und Sollwert überein, $X_s = X_0$, so ist das Drucköl beiderseits des Stellkolbens eingeschlossen. Die Stellgröße Y_0 verändert sich nicht. Eine Störung, durch die sich der Zufluß und damit der Flüssigkeitsstand erhöht, läßt den Schwimmer ansteigen, wodurch die beiden miteinander verbundenen Steuerkolben im Regler nach oben gehen. Dadurch fließt Drucköl in die obere Kammer des Stellzylinders. Da aus dessen unterer Kammer Öl über den Regler in den Ölvorratsbehälter abfließen kann, bewegt sich der Kolben nach unten und verkleinert die Durchflußöffnung im Ventil (Stellglied). Als Folge des geringeren Zulaufes sinkt der Flüssigkeitsspiegel und damit der Istwert X_i etwas unter den Sollwert X_s. Der absinkende Schwimmer steuert die Steuerkolben im Regler so um, daß der Kolben des Stellzylinders über die Mittellage nach oben geht, das Stellglied eine größere Durchflußöffnung freigibt und der Flüssigkeitsspiegel ansteigt.

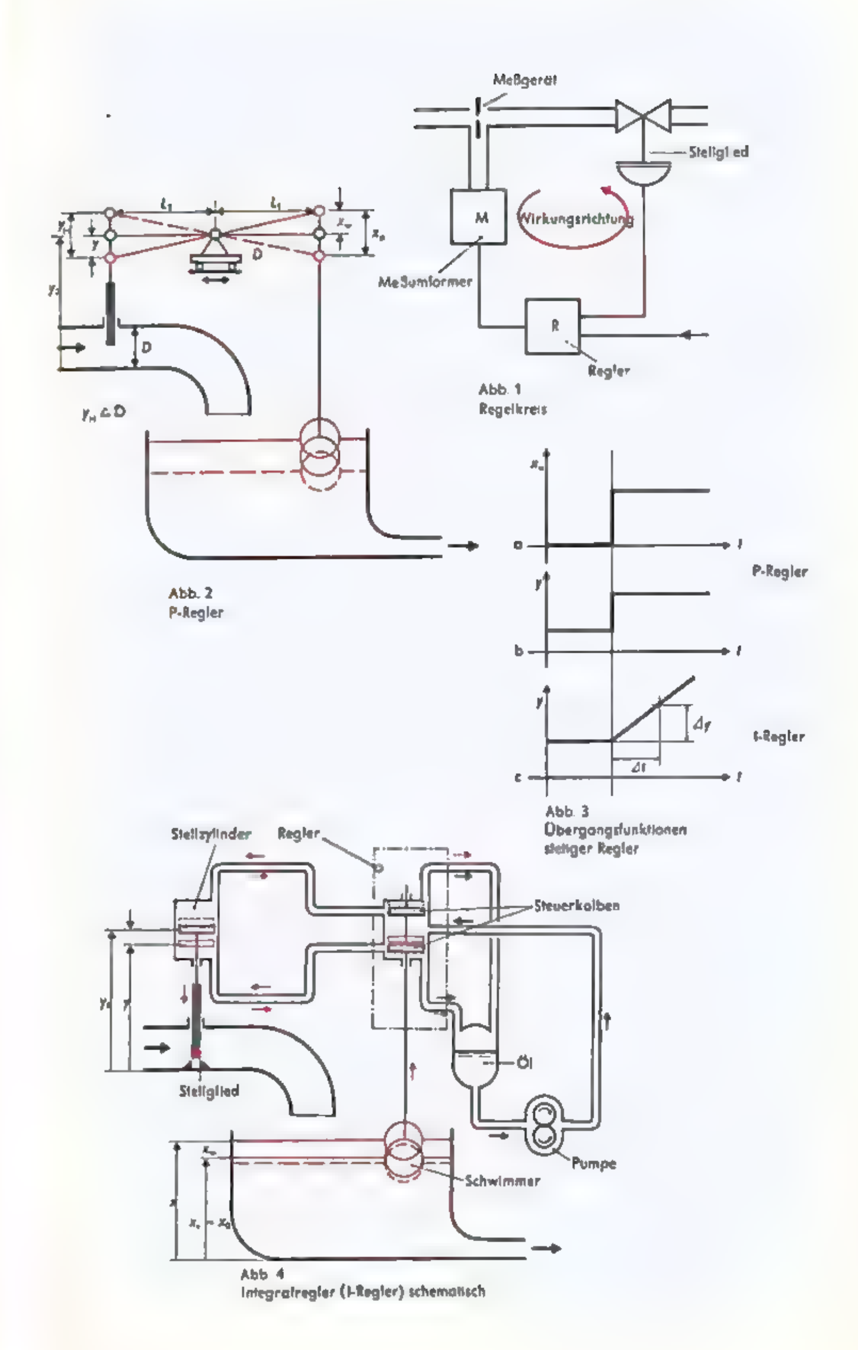


Abb. 1 Regelkreis

Abb. 2 P-Regler

Abb. 3 Übergangsfunktionen stetiger Regler

Abb. 4 Integralregler (I-Regler) schematisch

REGELUNGSTECHNIK III

Eine weitere Reglergrundform ist der Differentialregler. Dieser verändert die Stellgröße Y in Abhängigkeit der Änderungsgeschwindigkeit der Regelabweichung X_w. Die Wirkungsweise eines solchen Reglers ist schematisch in Abb. 1 dargestellt. Der Regler ist ähnlich dem P-Regler aufgebaut. Nur wirkt der Schwimmer über eine stoßdämpferähnliche Dämpfvorrichtung auf das Hebelsystem des Reglers ein. Ändert sich der Flüssigkeitsstand, der Istwert X, so langsam, daß bei ansteigendem Schwimmer Öl aus der oberen Kammer durch die im Kolben angeordnete Ausgleichsbohrung in die untere Kammer der Dämpfvorrichtung fließen kann, dann bleibt die Stellgröße Y unverändert. Ändert sich der Flüssigkeitsstand (Istwert X) so rasch, daß Öl nicht über die Ausgleichvorrichtung abfließen kann, dann wird das Hebelsystem des Reglers verdreht und die Stellgröße Y verändert. Kommt nun der Anstieg des Flüssigkeitsspiegels zum Stillstand, so wird die Veränderung der Regelabweichung ΔX_w in der Zeiteinheit Δt gleich Null. $\frac{\Delta X_w}{\Delta t} = 0$. Öl kann in der Dämpfvorrichtung über die Ausgleichbohrung von der oberen in die untere Kammer fließen. Das Hebelsystem geht in die waagrechte Ausgangslage zurück und obgleich der Flüssigkeitsstand über dem Sollwert steht, kehrt das Ventil in seine Grundstellung Y_0 zurück. Es wird also keine bleibende Änderung der Stellgröße Y erzeugt. Die Reglerfunktion wird durch die Gleichung $y = C_0 \cdot \frac{\Delta X_w}{\Delta t}$ oder $y = C_0 \cdot \frac{d X_w}{d t}$ angegeben. Ein Differential oder D-Regler ist für sich alleine zur Regelung von Vorgängen unbrauchbar und kann nur in Verbindung mit anderen Reglertypen verwendet werden. Das Verhalten des D-Reglers gibt Abb. 2 b wieder.

Durch die Kombination der beschriebenen Reglergrundformen lassen sich verschiedene Reglereigenschaften erreichen. Ein Proportional-Integral-Regler, kurz PI-Regler, reagiert auf eine sprunghafte Änderung der Regelabweichung X_w (Abb. 2a) zunächst wie ein P-Regler durch sprunghafte Änderung der Stellgröße Y (Abb. 2 c). Dadurch wird der größte Teil der Regelabweichung X_w ausgeglichen. Die noch verbleibende Regelabweichung gleicht der Integralteil des Reglers langsam aus. Dabei ändert sich die Stellgröße Y über der Zeit, was der geneigte Teil der Geraden in Abb. 2c darstellt. Der PI-Regler vereint schnelles Ansprechen mit großer Regelgenauigkeit Er findet daher bei Regelstrecken mit großer Anforderung an Genauigkeit Verwendung. Bei Regelkreisen mit langer Verzögerungszeit, z. B. bei der Temperaturregelung eines mit Flüssigkeit gefüllten Behälters, kommen PD- oder PID-Regler zum Einsatz. Der Proportional-Differential-Regler (PD-Regler) reagiert auf eine schnell auftretende Regelabweichung wie ein P-Regler mit einer sprunghaften Änderung der Stellgröße Y, wobei der D-Teil eine stärkere Veränderung der Stellgröße Y bewirkt als die Regelabweichung erfordert. Die Veränderung der Stellgröße Y und damit des Stellgliedes ist von der Änderungsgeschwindigkeit der Regelabweichung X_w abhängig (Abb. 2 d). Schnell auftretende Regelabweichungen führen zu einer größeren Veränderung der Stellgröße Y und damit des Stellgliedes als langsam auftretende Regelabweichungen. Nach diesem „Vorhalt" geht die Stellgröße Y wie bei einem D-Regler zurück, wobei sie jedoch auf einen Wert absinkt, den ein reiner P-Regler eingeregelt hätte.

Der Proportional-Integral-Differential-Regler (PID-Regler) verhält sich auf eine sprunghafte Regelabweichung zunächst wie der PD-Regler (Abb. 2 e). Nach dem Vorhalt wird aber die Stellgröße Y zurückgenommen und dann wie bei einem I-Regler stetig über die Zeit verändert.

Der *unstetige Regler* kann auf eine Regelabweichung X_w keine stetige, der Regelabweichung entsprechende Veränderung der Stellgröße Y bewirken, sondern reagiert nur mit einigen wenigen Stellgrößen Y.

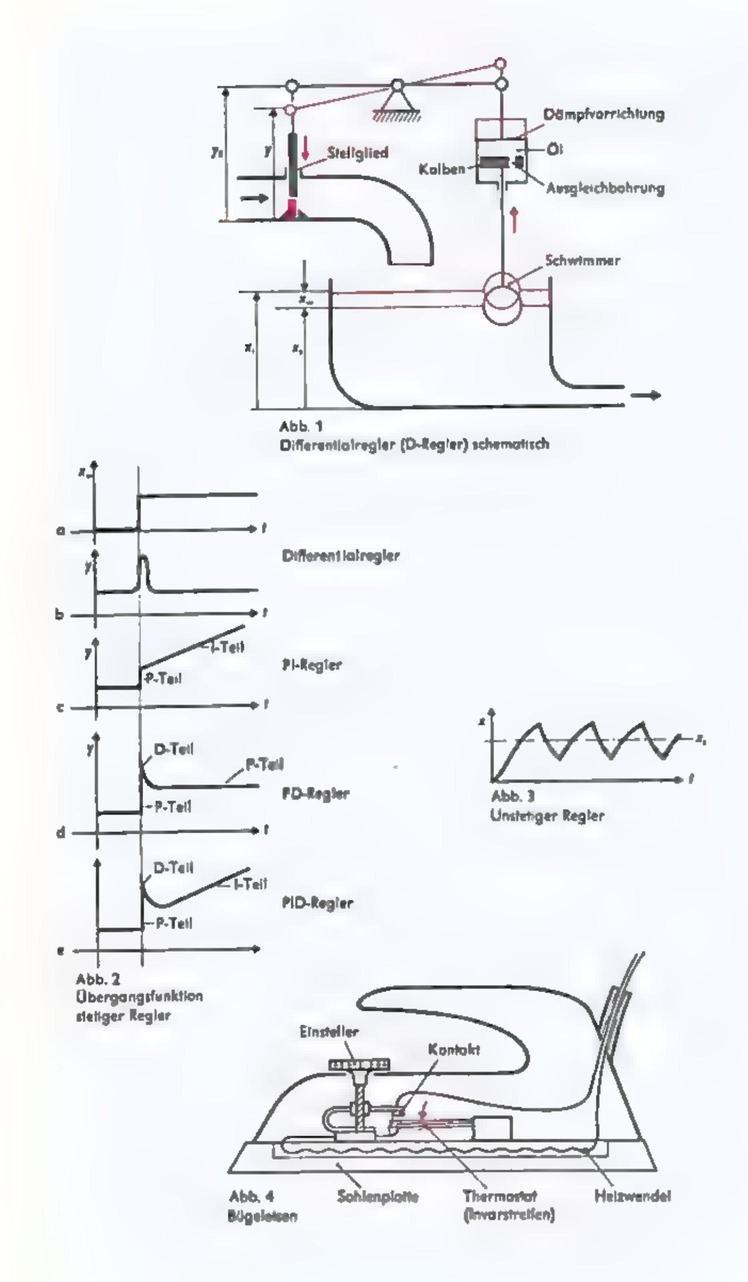


Abb. 1 Differentialregler (D-Regler) schematisch

Abb. 2 Übergangsfunktion stetiger Regler

Abb. 3 Unstetiger Regler

Abb. 4 Bügeleisen

Regler ohne Hilfsenergie: Regler kommen ohne Hilfsenergie aus, wenn die Meßeinrichtung eine ausreichende Kraft erzeugt, um das Stellglied zu bewegen. Zum Beispiel bringen Meßeinrichtungen zur Ermittlung des Flüssigkeitsstandes mit Hilfe eines Schwimmers eine hinreichend große Stellkraft zur Betätigung einer Absperreinrichtung auf. Auch einfache Temperaturregler kommen ohne Hilfskraft aus. Dieser Regler wird häufig als Thermostat bezeichnet und findet zur Regulierung der Raumheizung Anwendung. Die Meßeinrichtung (Abb. 1) besteht aus einem Wärmefühler. Dies ist ein dünnwandiges Röhrchen, das mit einer Flüssigkeit gefüllt ist, die sich bei Erwärmung besonders stark ausdehnt. Ein ebenfalls mit Flüssigkeit gefülltes Röhrchen kleinen Durchmessers, Kapillarrohr, verbindet den Wärmefühler mit dem Antrieb (Stellantrieb) des Ventils (Stellgliedes). Bei Erwärmung dehnt sich die Flüssigkeit im Meßfühler aus, überwindet die öffnend wirkende Federkraft des Ventiles und verringert im Ventil die Durchflußöffnung für das zum Heizkörper fließende Warmwasser. Durch Betätigung der Reguliervorrichtung kann der Sollwert, hier die Raumtemperatur, verändert werden.

Regler mit Hilfsenergie: Als Hilfsenergie können verschiedene Energieformen dienen. Regler mit elektrischer Hilfsenergie werden z. B. bei elektrischen Antrieben und Heizungen, also wenn die Stellgröße elektrisch gebildet ist, verwendet. Die elektrische Hilfsenergie zeichnet sich durch große Signalgeschwindigkeit aus. Die hydraulische Hilfsenergie liefert große Stellkräfte bei großer Übertragungsgeschwindigkeit. Hydraulische Regelungen finden dort mit Vorteil Anwendung, wo große Kräfte erforderlich und geringe Entfernungen zu überbrücken sind. Nachteilig ist der große Aufwand für Druckölerzeugung, Druckölspeicherung und für die Verbindungsrohrleitungen.

Pneumatische Regeleinrichtungen arbeiten einheitlich in einem Druckbereich von 0,2—1,0 kp/cm². Den schematischen Aufbau eines pneumatischen PID-Reglers zeigt Abb. 2. Der Regler arbeitet nach dem Prinzip des Kräftevergleichs. Auf einen schwenkbar gelagerten Waagebalken A üben die beiden unter Druck stehenden Bälge B und C eine Kraft aus. Der Sollwert wird von einem Einstell- oder Leitgerät zugeführt. Das Leitgerät ist ein Druckregler, dessen Ausgangsdruck, der Sollwert, stetig zwischen 0,2—1,0 atü verändert werden kann. Dieser Druck steht in dem Balg B an, der eine Kraft auf den Waagebalken A ausübt. Vom Meßumformer kommt ein der gemessenen Größe äquivalenter Druck, der Istwert. Dieser kann jeden Wert zwischen 0,2—1,0 atü annehmen und steht im Balg C an, der auf den Waagebalken A eine dem Ist-Druck entsprechende Kraft ausübt. Sind Ist- und Sollwert gleich, so sind auch die Drücke in C und B gleich. Die auf den Waagebalken A einwirkenden Kräfte werden aufgehoben. Werden aber die Drücke verschieden, dann verdreht sich der Waagebalken A und beeinflußt das aus Düse und aus der am Waagebalken A angebrachten Prallplatte aufgebaute Abgriffsystem. Am pneumatischen Abgriffsystem (Abb. 3) steht ein gleichbleibender Vordruck p_B von 1,1 atü an. Die Drossel begrenzt die maximal durch die Düse ausströmende Luftmenge. Die aus der Düse (Öffnung < 1 mm) ins Freie strömende Luft wird durch den Abstand zwischen Prallplatte und Düse geregelt. Zwischen Drossel und Düse baut sich ein Vorsteuerdruck p_A auf, der vom Abstand zwischen Düse und Prallplatte abhängt. Ist der Abstand groß, so strömt viel Luft aus und der Druck p_A ist gering. Ist der Abstand gering, dann wird die Luft angestaut und der Druck p_A ist groß. Der größtmögliche Weg der Prallplatte beträgt etwa 0,02 mm. Dadurch stellt sich eine maximale Änderung des Vorsteuerdrucks von etwa 0,1 kp/cm² ein. Dieser Druck wird einem pneumatischen Verstärker zugeführt (Abb. 2). Der Ausgang des Verstärkers ist mit dem Stellantrieb verbunden.

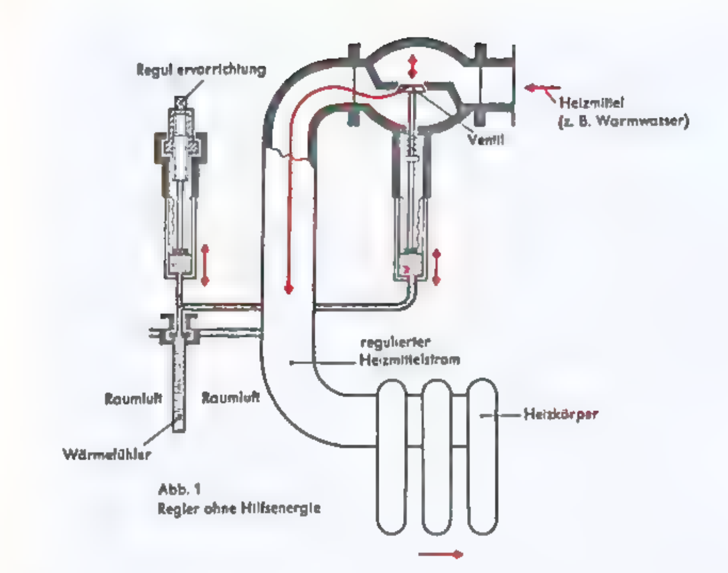


Abb. 1
Regler ohne Hilfsenergie

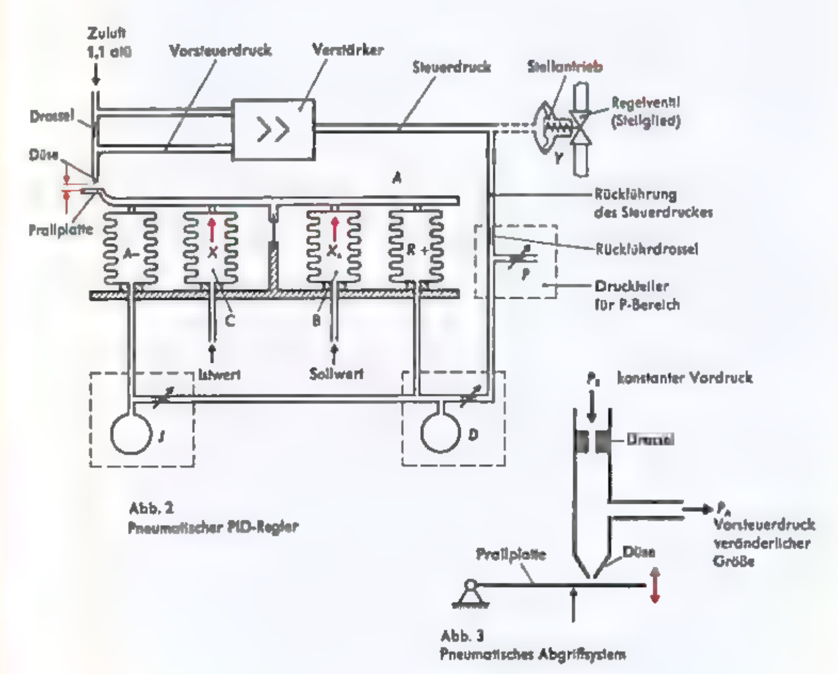


Abb. 2
Pneumatischer PID-Regler

Abb. 3
Pneumatisches Abgriffsystem

Der pneumatische Verstärker ist an den Regler (Abb. 1) angebaut. Der Verstärker besteht z. B. aus einer Membrandose, die sich unter dem von dem pneumatischen Abgriffssystem erzeugten Vorsteuerdruck p_a mehr oder weniger ausdehnt (Abb. 1). Bei kleinstem Vorsteuerdruck p_a dehnt sich die Membrandose nicht aus, und das Kugelventil läßt den vollen Druck der Zuluft auf den Stellantrieb wirken. Ist dagegen der Vorsteuerdruck am größten, dann sperrt das Kugelventil die Zuluft ab und der Stellantrieb wird drucklos. Zwischen diesen beiden Extremwerten steuert der pneumatische Verstärker jeden beliebigen Vorsteuerdruck p_a zu einem verhältnisgleichen Steuerdruck aus. Der auf den Stellantrieb des Stellgliedes einwirkende Steuerdruck wird zur Rückmeldung in den Regler zurückgeführt. Diese Rückführung kann im Regler beeinflußt werden, so daß die weiter vorne beschriebenen Reglerfunktionen mit geringem Aufwand erzielbar sind. Die in den Regler zurückgeführte Steuerluft begrenzt die Rückführdrossel. Zunächst wird der Steuerdruck in den Balg R + zurückgeführt. Die von diesem auf den Waagebalken A ausgeübte Kraft wirkt in gleicher Richtung wie die vom Sollwert im Balg B hervorgerufene Kraft. Da beide der durch den Istwert und Balg C auf den Waagebalken A ausgeübten Kraft entgegenwirken, wird die Empfindlichkeit des Reglers geringer und der Proportionalbereich größer. Durch den Druckleiter P, Abb. 2, S. 377, kann ein einstellbarer Teilstrom der rückgeführten Steuerluft ins Freie abgeleitet werden. Je größer die abgezweigte Menge ist, desto kleinerer Druck wirkt auf den Balg R+ ein, wodurch der Einfluß des Steuerdruckes auf den Regler geringer wird. Eine entsprechend größere Wirkung übt die Abweichung des Ist- vom Sollwert (Regelabweichung) auf den Waagebalken und über das Abgriffssystem auf den Steuerdruck aus. Der Proportionalbereich wird kleiner, der Regler empfindlicher. Läßt man keinen Druck in den Rückführbalg R+ gelangen, so arbeitet der Regler nur noch „Auf" — „Zu" als Zweipunktregler. Der Behälter D wirkt als Puffer, denn sein Volumen muß erst aufgefüllt werden ehe der Rückführbalg R+ ansprechen kann. Bei einer schnell auftretenden Regelabweichung wirkt daher der Steuerdruck zunächst nicht hemmend auf den Regler ein, da der die Empfindlichkeit des Reglers verringernde Einfluß der Rückführung verzögert wird. Der Steuerdruck ändert sich daher zunächst ebenso stark wie bei einem „Auf"-„Zu"-Regler. Erst wenn genügend Luft über den Behälter D in den Balg R+ eingeströmt ist, wird die Empfindlichkeit des Reglers herabgesetzt, und der Steuerdruck wird auf das Druckniveau des Proportional-(P) Reglers herabgeregelt. Der Regler zeigt bis dahin PD-Verhalten. Nun besteht aber noch eine Verbindung zwischen R+ und R— Balg. In den Balg R— baut sich erst ein Druck auf, wenn der Verzögerungsbehälter I gefüllt ist. Es besteht dann zwischen den Bälgen R+ und R— Druckausgleich, wodurch die den Steuerdruck begrenzende Wirkung der Rückführung beseitigt ist.

Stellantrieb: Das in Abb. 2 gezeigte Membranventil ist das am häufigsten eingesetzte pneumatisch betriebene Stellglied. Der Steuerdruck wirkt auf die Membran des Stellantriebes ein, wobei die Stellkraft von der Höhe des Steuerdruckes und von der Membranfläche abhängt. Letztere wird durch den Membrandurchmesser bestimmt. Die Membran übt infolge des Steuerdruckes eine Kraft auf die Ventilspindel aus, die der Kraft der Rückholfeder und der auf den Ventilkegel wirkenden Druckkraft des durchfließenden Mediums entgegenwirkt. Ist der Steuerdruck am höchsten, dann schließt die auf die Ventilspindel einwirkende Membrankraft das Ventil, indem der Ventilkegel gegen den Ventilsitz gepreßt wird. Wirkt kein Steuerdruck auf die Membran ein, so befindet sich der Ventilkegel unter dem Druck des Mediums und unter dem Zug der Rückholfeder in seiner oberen Endlage. Das Ventil ist geöffnet. Jeder Größe des Steuerdruckes ist eine ganz bestimmte Stellung des Ventils zugeordnet.

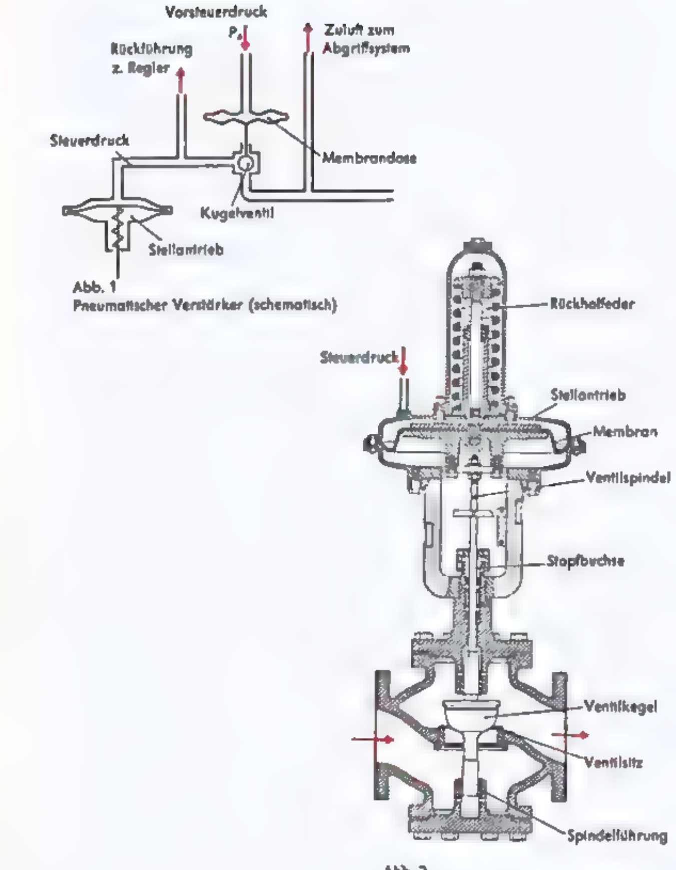


Abb. 1
Pneumatischer Verstärker (schematisch)

Abb. 2
Stellglied mit pneumatischem Stellantrieb

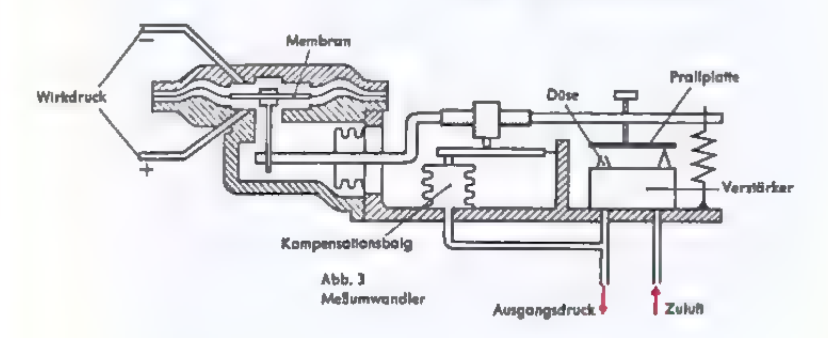


Abb. 3
Meßumwandler

REFLEXION, BRECHUNG UND BEUGUNG DES LICHTES

Trifft ein Lichtstrahl auf die Grenzfläche zweier verschiedener durchsichtiger Medien, z. B. aus der Luft auf einen Glasblock, so wird ein Teil des Lichtes in das erste Medium zurückgeworfen (reflektiert), der andere Teil dringt in das zweite Medium ein. Er ändert dabei jedoch seine ursprüngliche Ausbreitungsrichtung, er wird gebrochen. Man bezeichnet diese beiden Erscheinungen als Reflexion und Brechung (Refraktion; Abb. 1). Der Strahl r wird so reflektiert, daß er mit dem Einfallslot l (der Senkrechten auf der Grenzfläche) den gleichen Winkel α bildet wie der einfallende Strahl e (Einfallswinkel = Reflexionswinkel). Einfallender Strahl e, Einfallslot l, reflektierender Strahl r und gebrochener Strahl g liegen ferner in einer Ebene. – Die mathematische Beziehung, die zwischen dem Einfallswinkel α und dem Brechungswinkel β besteht, beschreibt das Brechungsgesetz: $\sin \alpha / \sin \beta = n$; n ist der (relative) Brechungsindex (die Brechungszahl).

Weißes Licht wird bei der Brechung in verschiedene Farben, die Spektralfarben, zerlegt (Abb. 2); es entsteht ein Spektrum (Abb. 3). Rot wird am wenigsten, Violett am stärksten gebrochen (Dispersion). Vereinigt man die Lichtstrahlen der verschiedenen Spektralfarben mit einer Linse, so entsteht wiederum weißes Licht. Dies gelingt auch schon bei Verwendung von nur zwei Spektralfarben (in bestimmtem Intensitätsverhältnis), wenn sie zueinander komplementär sind (Komplementärfarben). Jeder Spektralfarbe entspricht eine bestimmte Wellenlänge des Lichtes. Das Spektrum glühender, fester oder flüssiger Stoffe und sehr stark verdichteter Gase ist kontinuierlich, es enthält alle Wellenlängen (die Farben Rot bis Violett). Daß dennoch einzelne Wellenlängen im Spektrum der Sonne fehlen (es erscheinen einzelne dunkle Linien, die sog. Fraunhoferschen Linien), beruht auf der Absorption dieser Wellenlängen im äußeren, gasförmigen Teil der Sonne. Glühende Gase emittieren unter normalen Bedingungen Licht von einzelnen, ganz bestimmten Wellenlängen; es erscheint ein Linienspektrum, bestehend aus einzelnen Spektrallinien (bei Atomen), oder ein Bandenspektrum (bei Molekülen), das eine Vielzahl eng benachbarter Spektrallinien aufweist. Diese Wellenlängen können ebenso vom Gas absorbiert werden. Jedes chemische Element zeigt im gasförmigen Zustand ein ganz charakteristisches Spektrum, es läßt sich damit nachweisen (Spektralanalyse; Kirchhoff und Bunsen, 1859). Zum Nachweis dient ein Spektralapparat (Abb. 4).

Bringt man in den Strahlengang des Lichtes einen Gegenstand von hinreichend kleinen Dimensionen, so beobachtet man keinen scharfen geometrischen Schatten (wie er der geradlinigen Ausbreitung des Lichtes entspricht), sondern eine bestimmte Anordnung heller und dunkler Gebiete (z. B. Streifen). Eine derartige Abweichung vom geradlinigen Strahlengang bezeichnet man als Beugung (Diffraktion). Sie läßt sich nur mit Hilfe der Wellentheorie des Lichtes erklären (Überlagerung von einzelnen Lichtwellen [Interferenz]). Eine regelmäßige Anordnung sehr schmaler, eng benachbarter Spalte oder durchlässiger Streifen ist ein Beugungsgitter (Abb. 5). Fällt weißes Licht auf ein Beugungsgitter, so kann man auch hier ein Spektrum beobachten, da die Richtungen, in denen Helligkeit auftritt, von der Wellenlänge abhängen. Im Gegensatz zur Brechung wird jedoch bei der Beugung das rote, längerwellige Licht stärker aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt als das violette, kürzerwellige.

Die ringförmigen Höfe um Sonne und Mond sind Beugungserscheinungen an kleinen Wassertröpfchen der Atmosphäre. Der äußere Rand eines Hofes erscheint daher (schwach) rot gefärbt. Halos hingegen sind Brechungs- und Spiegelungserscheinungen an Eiskristallen (meist in dünnen Zirruswolken). Die Farbfolge der Ringe erscheint, falls sie überhaupt erkennbar ist, in umgekehrter Anordnung (Rot innen, Violett außen). Am Zustandekommen eines Regenbogens wirken Brechungs-, Reflexions- und Beugungserscheinungen mit. Das Blau des Himmels beruht auf einer Ablenkung (Streuung) des Sonnenlichtes auf seinem Weg durch die Atmosphäre, wobei das kürzerwellige (blaue) Licht stärker aus seiner Richtung abgelenkt wird als das längerwellige (rote).

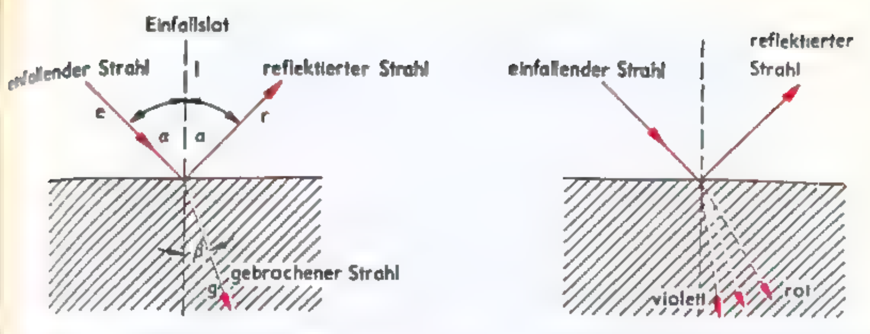


Abb. 1 Reflexion und Brechung
Abb. 2 Zerlegung des Lichtes bei der Brechung

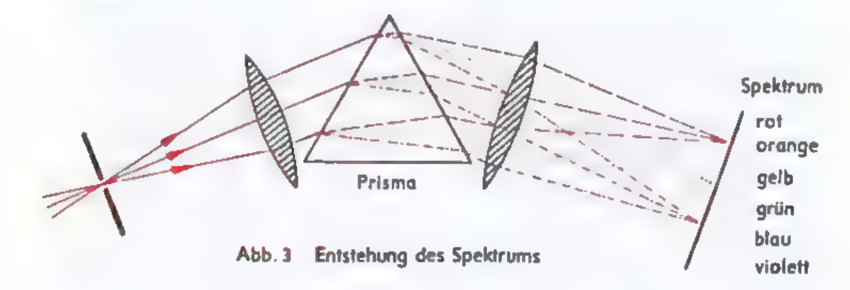


Abb. 3 Entstehung des Spektrums

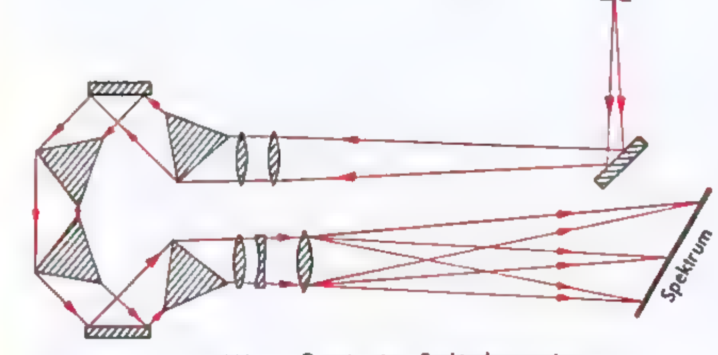


Abb. 4 Prinzip eines Spektralapparates

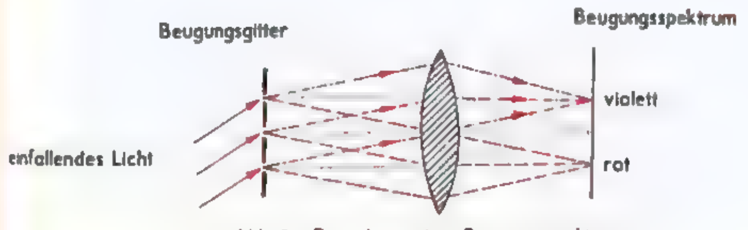


Abb. 5 Entstehung eines Beugungsspektrums

LINSEN

Beim Durchgang durch ein Prisma ändern die Lichtstrahlen ihre Richtung, und zwar werden sie immer von der brechenden Kante weg abgelenkt (s. Reflexion, Brechung..., S. 380). Man kann sich nun eine Anzahl wie in Abb. 1a angeordneter Prismen vorstellen, deren brechende Flächen nach der Mitte zu immer weniger gegeneinander geneigt sind: Lichtstrahlen durch die äußersten Prismen werden dann am stärksten zur Mitte hin gebrochen, während in der mittleren Platte mit den zwei parallelen Flächen überhaupt keine Ablenkung erfolgt. Damit werden parallele Strahlen beim Durchgang durch diese Anordnung nach der Achse hin gebrochen und in einem Punkt (F') zusammengeführt. Auch von einem Punkt P ausgehende Strahlen werden durch diese Prismen so abgelenkt, daß sie sich wieder in einem Punkt P' vereinigen. Setzt man sehr viele Prismen dicht aneinander, so werden schließlich die vielen kleinen geneigten Flächen zu einer Kugelfläche. Da die Strahlen zusammengeführt werden, heißt der brechende Körper *Sammellinse*. Eine Sammellinse ist also in der Mitte dicker als am Rand (konvex).
Ist eine Linse in der Mitte dünner als am Rand (konkav), kann man entsprechende Überlegungen anstellen (Abb. 1b) und feststellen, daß alle Strahlen von der Mitte weg auseinanderlaufen; solche Linsen heißen *Zerstreuungslinsen*. Nach der Brechung sieht es so aus, als ob vorher parallele Strahlen nun von einem Punkt F herkämen, während von einem Punkt ausgehende Strahlen von einem anderen Punkt zu stammen scheinen (vgl. Abb. 3b).
Abb. 2 zeigt die verschiedenen Formen von Sammel- und Zerstreuungslinsen. Die jeweils letzte Linse in der Gruppe mit den zwei gleichsinnig, aber verschieden stark gekrümmten Flächen heißt Meniskus; diese Form wird besonders für Brillengläser bevorzugt.
Die Eigenschaften der Linsen beschreibt das Brechungsgesetz: Zur Achse parallele Strahlen werden nach der Brechung durch eine Sammellinse in einem Punkt, dem Brennpunkt F, vereinigt. Umgekehrt werden Strahlen durch den Brennpunkt nach der Brechung achsenparallel. Strahlen durch den Linsenmittelpunkt behalten ihre Richtung bei. Bei Zerstreuungslinsen heißt der erste Satz entsprechend: Zur Achse parallele Strahlen verlaufen nach der Brechung so, als ob sie vom Brennpunkt herkämen. Zwei von den drei Aussagen des Brechungsgesetzes genügen bereits, um die Abbildung eines Punktes von G durch eine Linse zu konstruieren (Abb. 3a und 3b). Sammellinsen geben ein *reelles* Bild, das im Vereinigungspunkt der Strahlen auf einer Mattscheibe, einem Schirm oder einer photographischen Platte sichtbar gemacht werden kann. Dies ist bei der Abbildung durch Zerstreuungslinsen nicht möglich; es entsteht nur das scheinbare, *virtuelle* Bild, von dem die Strahlen auszugehen scheinen.
Die Abbildung mit einer dünnen Linse läßt sich berechnen nach der Formel:

$$\frac{1}{g}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f}=D$$

(g = Gegenstandsweite in Meter, b = Bildweite in Meter, f = Brennweite in Meter). Statt der Brennweite wird für eine Linse häufig auch ihre Brechkraft in Dioptrien angegeben. Je kürzer die Brennweite einer Linse ist, desto größer ist ihre Brechkraft D. Eine Linse von z. B. f = 20 cm = 0,2 m hat also eine Brechkraft von 5 Dioptrien. Bei Zerstreuungslinsen ist f bzw. D negativ; das führt dann auch zu negativem b, da das virtuelle Bild auf der gleichen Seite der Linse wie der Gegenstand liegt.
Einzelne Linsen haben physikalisch bedingte Fehler, die eine ganz punktscharfe Vereinigung der Strahlen verhindern. Die Abbildung läßt sich verbessern, wenn man Linsen mit entgegengesetzten Abweichungen kombiniert (s. S. 396).

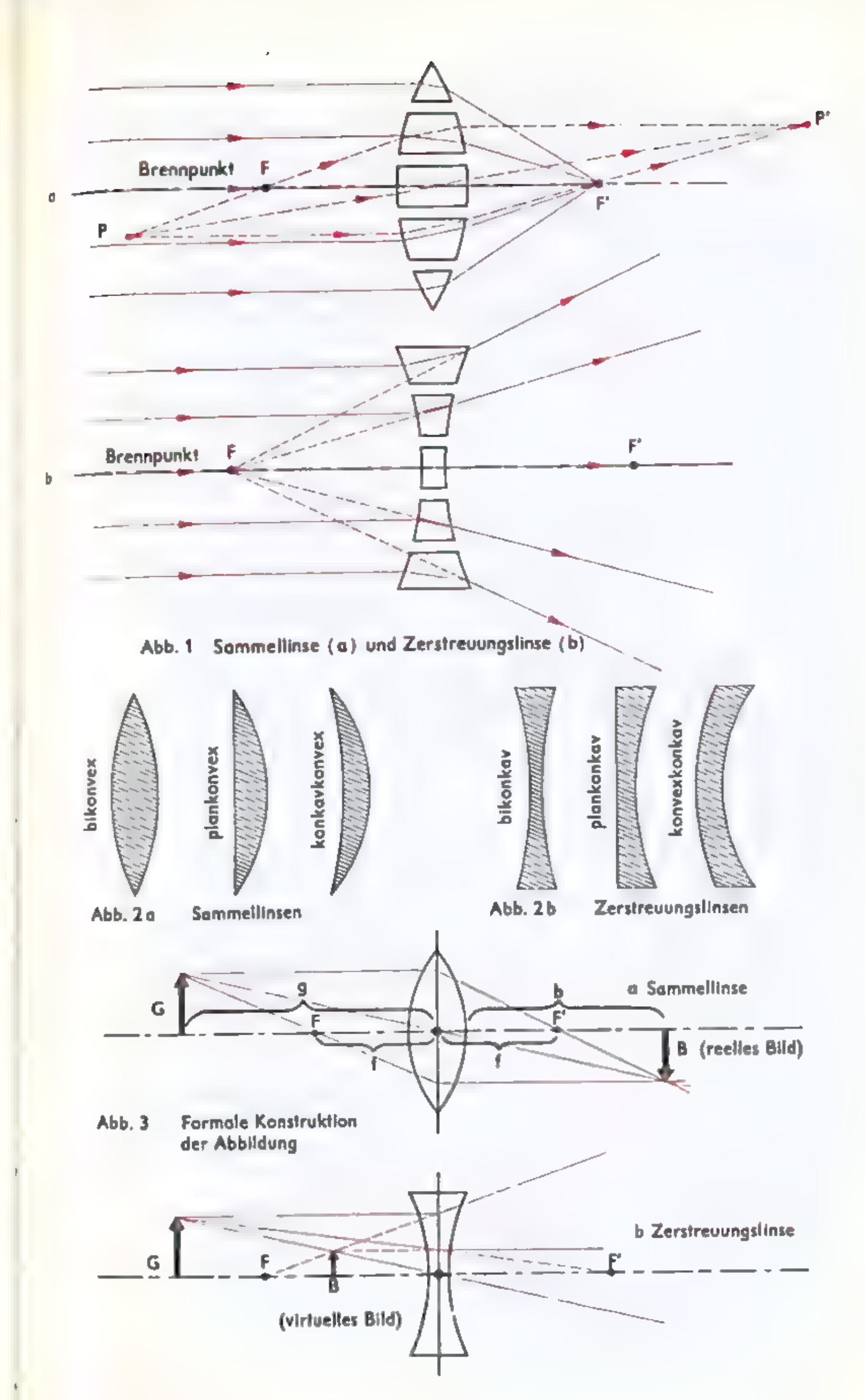


Abb. 1 Sammellinse (a) und Zerstreuungslinse (b)

Abb. 2a Sammellinsen

Abb. 2b Zerstreuungslinsen

Abb. 3 Formale Konstruktion der Abbildung

SPIEGEL

Spiegelung findet an glatten Oberflächen statt; diese werfen auffallendes Licht nicht gestreut, sondern gerichtet zurück. Über die Richtung des reflektierten Strahls sagt das *Reflexionsgesetz:* Der einfallende Strahl, die Senkrechte auf der spiegelnden Fläche und der reflektierte Strahl liegen in einer Ebene. Der Ausfallswinkel ist gleich dem Einfallswinkel (Abb. 1).

Ebene Spiegel

Von einem Gegenstand gehen Strahlen nach allen Richtungen auseinander. Wird solch ein Strahlenbündel von einem ebenen Spiegel reflektiert, so streben die Strahlen auch nach dieser Richtungsänderung weiter auseinander. Sie werden sich also nicht mehr vereinigen und können daher auch kein reelles Bild ergeben; aber sie scheinen alle von einem Punkt hinter dem Spiegel herzukommen, von dem virtuellen Bild des Gegenstandes. Das virtuelle Bild liegt im gleichen Abstand hinter der spiegelnden Fläche wie der Gegenstand vor ihr.

Gewölbte Spiegel

Denkt man sich die Wand einer Kugel in lauter ganz kleine ebene Flächen aufgeteilt, dann steht der Radius auf jeder dieser kleinen Flächen senkrecht. Damit kann man das Reflexionsgesetz auch auf einen Spiegel anwenden, dessen Oberfläche die Form einer Kugelschale hat: Ein Strahl durch den Krümmungsmittelpunkt *M* wird also in sich selbst zurückgeworfen. Alle Strahlen schließen nach der Reflexion wieder den gleichen Winkel mit dem Radius ein, so daß zur Hauptachse parallele Strahlen in einem Achsenpunkt genau in der Mitte zwischen Krümmungsmittelpunkt und Spiegel vereinigt werden. Dieser Punkt ist der Brennpunkt *F* des Hohlspiegels; die Brennweite ist halb so groß wie der Krümmungsradius. Umgekehrt werden Strahlen durch den Brennpunkt nach der Reflexion Parallelen zur Hauptachse. Abb. 2 zeigt die Bildkonstruktion beim Hohlspiegel (Sammelspiegel). Für die Rechnung gilt die Gleichung:

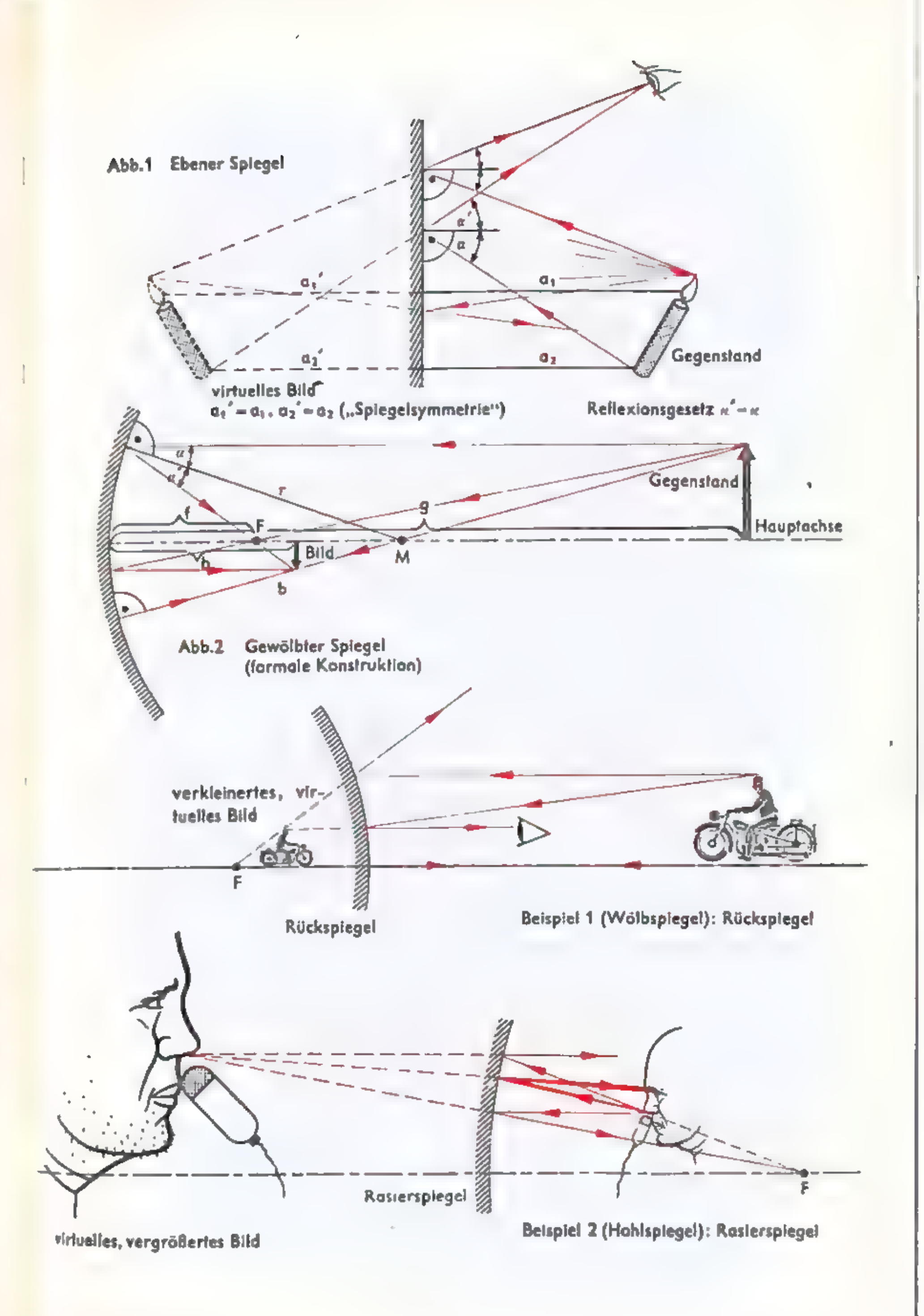
$$\frac{1}{g}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f}=\frac{2}{r}$$

(g = Gegenstandsweite, b = Bildweite, f = Brennweite [= $\frac{1}{2}$ Krümmungsradius r]). Beim Wölbspiegel (Zerstreuungsspiegel) entsteht ein virtuelles Bild hinter dem Spiegel. Brennweite und Bildweite sind in der Gleichung negativ.

Anwendungen des Spiegels:

Beim *Rückspiegel* des Autos (Beispiel 1) gibt ein Wölbspiegel ein verkleinertes virtuelles Bild von einem größeren Bereich hinter dem Fahrer. Ein *Rasierspiegel* (Beispiel 2) ist ein Hohlspiegel, bei dem sich der Benutzer innerhalb der Brennweite bewegt, so daß er im Spiegel sein virtuelles, aufrechtes und vergrößertes Bild sieht.

Für die formale Konstruktion wurden in den Beispielen wieder zwei besonders geeignete Strahlen gewählt, nämlich der Strahl parallel zur Hauptachse und der Strahl durch den Brennpunkt. Tatsächlich zur Wirkung kommt aber immer nur das Strahlenbündel, das ins Auge gelangt. – Zur Anwendung des Spiegels im *Spiegelteleskop* s. S. 390.



LUPE UND MIKROSKOP

Wie gut sich Einzelheiten an einem Gegenstand erkennen lassen, hängt davon ab, unter welchem Sehwinkel sie dem Auge erscheinen. Weit entfernte Gegenstände erscheinen sehr klein, deshalb benützt man ein „Fernrohr", das den Sehwinkel vergrößert (s. S. 390). Bei sehr kleinen Gegenständen ist auch aus kurzer Betrachtungsentfernung der Sehwinkel noch zu gering. Er vergrößert sich zwar, wenn man das Auge noch näher hinführt, jedoch endet das Akkommodationsvermögen (Fähigkeit zum Scharfstellen) des Auges bei etwa 40 bis 15 cm. Mit Hilfe von Lupe und Mikroskop aber sieht man je nach Einstellung in dieser Entfernung oder auch im Unendlichen ein Bild des Gegenstandes unter stark vergrößertem Sehwinkel. Für die Angabe der Vergrößerung wurde eine „deutliche Schweite von 25 cm" vereinbart; eine achtfache Lupe zeigt also den Gegenstand achtmal so groß, wie ihn das unbewaffnete Auge aus 25 cm Abstand sieht.

Die *Lupe* (Abb. 1) besteht aus einer Sammellinse (oder einem sammelnden System) kurzer Brennweite. Bei der Betrachtung befindet sich der Gegenstand innerhalb der Brennweite, so daß ein vergrößertes, aufrechtstehendes virtuelles Bild im Abstand von etwa der deutlichen Sehweite entsteht. Man kann die Lupe auch mit einer Vorsatzlinse vergleichen: Sie ermöglicht noch stärker als eine „Lesebrille" an nahe Gegenstände heranzugehen, während das Auge auf eine größere Entfernung akkommodiert bleibt.

Beim *Mikroskop* (Abb. 2) erfolgt die Vergrößerung in zwei Stufen: Beim Fernrohr war der Gegenstand sehr weit entfernt, das vom Objektiv mit langer Brennweite entworfene reelle Bild etwa im hinteren Brennpunkt. Beim Mikroskop dagegen ist die Objektivbrennweite sehr kurz (etwa 46 bis 1,6 mm), der Gegenstand kommt so nahe an den vorderen Brennpunkt, daß die Bildweite viel größer als die Brennweite ist. Die Bildweite ist durch die Tubuslänge von meist 160 mm vorgegeben; damit ist das reelle Zwischenbild (bei den obigen Brennweiten) etwa 2,5- bis 100mal größer als das Objekt (anstelle der Brennweite wird allgemein bei Mikroskopobjektiven gleich die Vergrößerung angegeben). In der Zwischenbildebene befinden sich Gesichtsfeldblende und gegebenenfalls Maßstäbe, Netzeinteilungen o. ä. Das Zwischenbild wird nun mit einer Lupe, dem Okular, betrachtet und dabei nochmals vergrößert. Verwendet man z. B. in einem Mikroskop ein Objektiv 40 : 1 und ein Okular 10×, so ist die Gesamtvergrößerung 400 : 1. Ein Objektiv 100 : 1 und ein Okular 25 × ergäben eine Vergrößerung 2500 : 1, die aber nicht mehr sinnvoll ist. Denn durch die Wellennatur des Lichts können nur Einzelheiten bis etwa zur Größe der Lichtwellenlänge (0,4 bis 0,7 Tausendstel Millimeter) wiedergegeben werden. Das entspricht bei großer Apertur (d. h. großer Lichtstärke, wodurch die Beugung gering bleibt) einer „förderlichen Vergrößerung" um das Tausendfache. Stärkere Vergrößerung wird durch die kurze Wellenlänge der Elektronenstrahlen mit dem Elektronenmikroskop (s. S. 388) erreicht. Eine wichtige Rolle für das Funktionieren des Mikroskops spielt auch der Kondensor, der das kleine Objekt in der Weise intensiv und gleichmäßig beleuchten soll, daß das Licht möglichst vollständig in das Objektiv übergeführt wird.

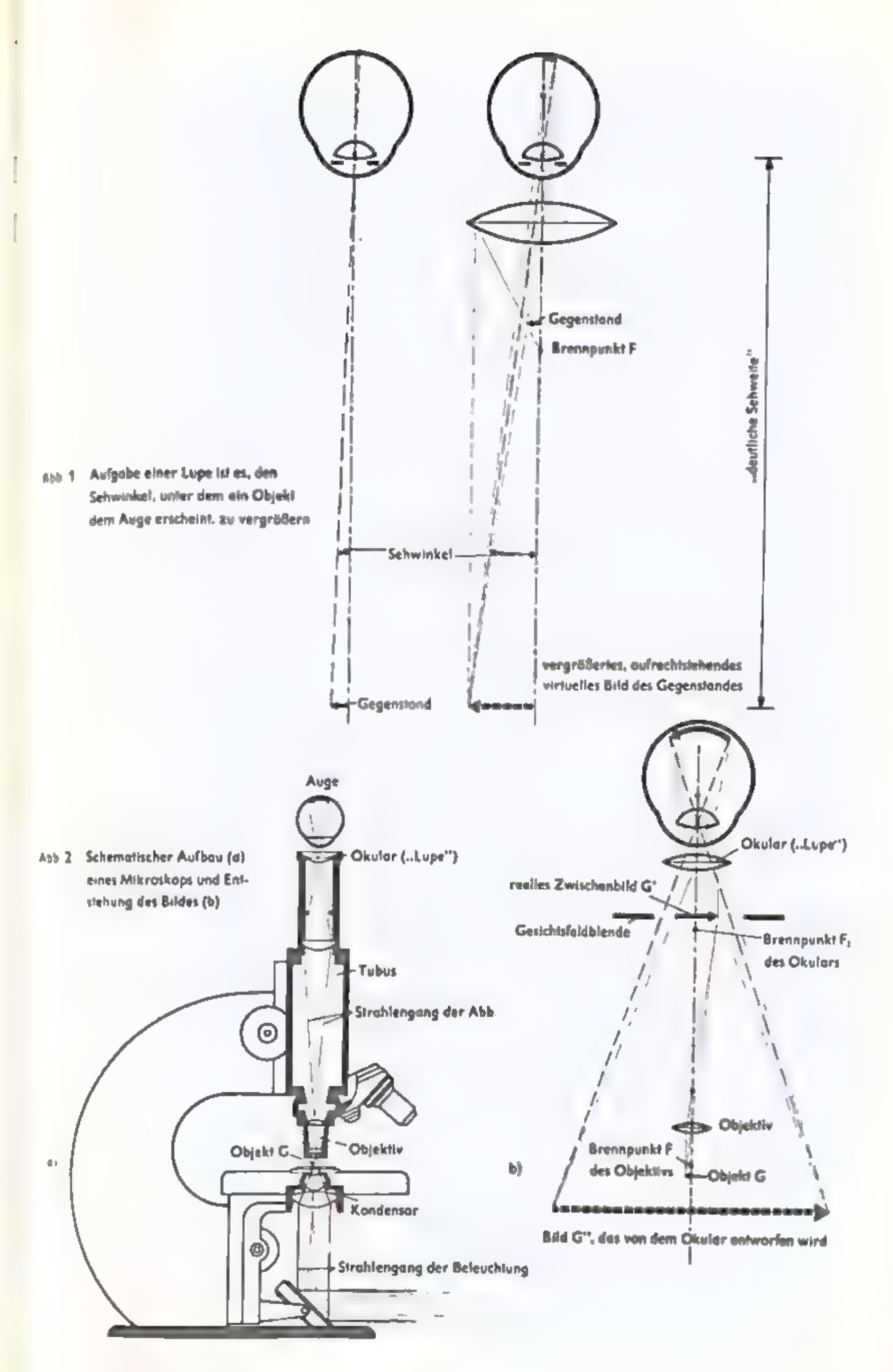


Abb. 1 Aufgabe einer Lupe ist es, den Sehwinkel, unter dem ein Objekt dem Auge erscheint, zu vergrößern

Abb. 2 Schematischer Aufbau (a) eines Mikroskops und Entstehung des Bildes (b)

ELEKTRONENMIKROSKOP

Da das Auflösungsvermögen des Lichtmikroskops durch die Wellenlänge des Lichts begrenzt ist (s. S. 386), suchte man nach Strahlungen kürzerer Wellenlänge, die sich auch ablenken und damit zur Abbildung verwenden lassen. Diese Möglichkeit bieten Elektronenstrahlen, d. h. beim Durchlaufen eines Feldes auf hohe Geschwindigkeit gebrachte freie Elektronen. Je nach ihrer Geschwindigkeit kann man ihnen eine bestimmte Wellenlänge zuordnen; sie verhalten sich unter gewissen Bedingungen wie eine Wellenstrahlung. Da ein Elektron eine negative Ladung trägt, wird es in einem elektrischen Feld beschleunigt (Abb. 1), z. B. zur positiven Platte eines Kondensators oder ganz allgemein zu Orten höherer Spannung (höheren Potentials) hin, in der entgegengesetzten Richtung gebremst. Bei der Darstellung eines elektrischen Feldes werden alle Punkte, die auf gleicher Spannung liegen, durch „Äquipotentiallinien" verbunden. Fliegt ein Elektron schräg durch ein elektrisches Feld (z. B. zwischen zwei geladenen Drahtnetzen; Abb. 2), so erfährt es eine zusätzliche Beschleunigung auf die Linien höheren Potentials zu, es ändert seine Richtung. Aufgrund dieser „Brechung" baute man — analog zu den Glaslinsen für Licht — für Elektronen elektrostatische Linsen aus kugelig gewölbten Drahtnetzen (Abb. 3). Solche Netze im Strahlengang haben aber Nachteile, deshalb verwendet man Linsen auf der Grundlage von Rohren (Abb. 4) oder Lochblenden (Abb. 5). Daß sich bei dem symmetrischen Verlauf der Potentiallinien zerstreuende und sammelnde Wirkung nicht aufheben, kommt daher, daß die Elektronen das zerstreuende Gebiet mit höherer Geschwindigkeit durchlaufen, wodurch sich die Ablenkung geringer auswirkt. Neben den elektrostatischen Linsen gibt es auch magnetische Elektronenlinsen: Ein bewegtes Elektron ist ja die Urform des elektrischen Stromes, es hat also auch ein Magnetfeld um sich. Daß auf einen Strom durch Wechselwirkung seines Magnetfeldes mit einem anderen Kräfte ausgeübt werden, ist die Grundlage aller elektrischen Maschinen. Das bewegte Elektron erfährt deshalb in einem Magnetfeld eine Richtungsänderung. Damit die Feldstärke des Magnetfeldes hoch wird, verwendet man als magnetische Linsen von Eisen umgebene Spulen mit schmalem Spalt (Abb. 6).

Der prinzipielle Aufbau eines magnetischen oder der eines elektrostatischen Elektronenmikroskops ist dem eines Lichtmikroskops für photographische Aufzeichnung sehr ähnlich (Abb. 7a bis 7c): Die Elektronen werden von der Glühkathode ausgesandt, beschleunigt, und durch den Kondensor auf das zu untersuchende Objekt gebündelt. Das Objekt (Bakterie, Virus, „Kohleabdruck" [= auf einen Mikrokristall aufgedampfte Kohlehülle, aus der der „undurchsichtige" Kristall herausgelöst wurde]) liegt auf einem äußerst dünnen Kollodiumhäutchen. Je nach Dicke und Zusammensetzung des Objekts werden die Elektronenstrahlen unterschiedlich geschwächt, das Objektiv vereinigt sie zum vergrößerten Zwischenbild. Von diesem wird durch die Projektionsoptik ein weiter vergrößertes Bild zur Sichtbarmachung auf einem Fluoreszenzschirm oder einer für Elektronen empfindlichen Photoplatte entworfen.

Grünes Licht hat eine Wellenlänge von rund 1/2000 mm – mit 50000 Volt beschleunigte Elektronen haben eine 100000mal kleinere Wellenlänge. Die Apertur (vgl. S. 386) ist zwar 1000mal kleiner als beim Lichtmikroskop, die Beugungsunschärfe entsprechend 1000mal größer, aber es bleibt ein Gewinn an Auflösung vom Faktor 100. Elektronenmikroskope erlauben zusammen mit der photographischen Nachvergrößerung der Photoplatte Vergrößerungen von 1 : 100000 bis 1 : 500000.



Abb. 1 Elektron im elektrischen Feld



Abb. 2 „Brechung" des Elektronenstrahls

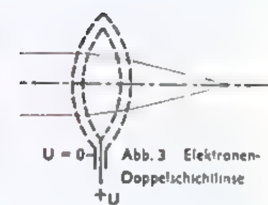
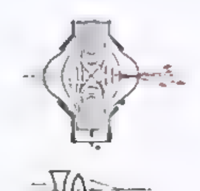
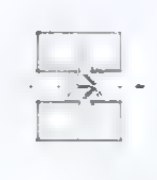


Abb. 3 Elektronen-Doppelschichtlinse



Abb. 4 Elektronenlinse in Rohrform im Vergleich mit entsprechenden optischen Linsen


Abb. 5 Elektronenlinse in Lochblendenform im Vergleich mit entsprechenden optischen Linsen


Abb. 6 Spule mit Eisenumhüllung als magnetische Linse

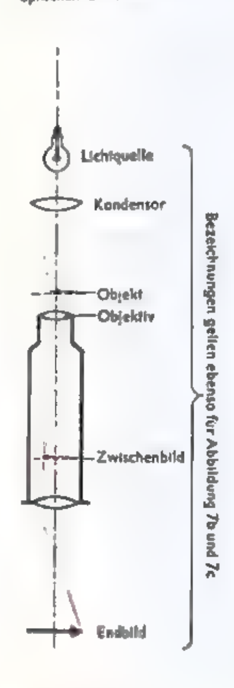


Abb. 7a Lichtmikroskop

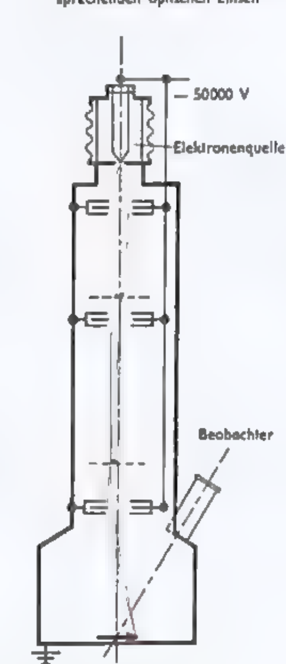


Abb. 7b Elektrostatisches Elektronenmikroskop (Lochblendenlinse)

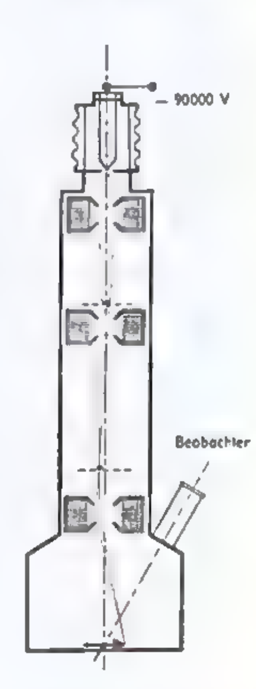


Abb. 7c Magnetisches Elektronenmikroskop (Spulen)

FERNROHRE I

Von Fernrohren wird häufig gesagt, daß sie „die Dinge vergrößern“ oder „die Ferne heranholen“ – ihre tatsächliche Wirkung besteht darin, daß sie den Sehwinkel vergrößern. Wir sind gewohnt, die Größe oder die Entfernung von Gegenständen danach abzuschätzen, unter welchen Winkeln sie uns erscheinen (Abb. 1).
Im Prinzip bestehen alle Linsenfernrohre (Refraktoren) aus einem dem Objekt zugewandten *Objektiv* und einem dem Auge zugewandten *Okular*. Die Strahlen von dem fernen Gegenstand treten etwa parallel in das Objektiv ein und werden in seinem Brennpunkt vereinigt (vgl. Linsen S. 382). An der gleichen Stelle hat das Okular ebenfalls seinen Brennpunkt, so daß die Strahlen das Okular wieder parallel verlassen; man sieht den Gegenstand also weiterhin im Unendlichen, aber unter größerem Winkel. Die Vergrößerung ist gleich dem Verhältnis Objektivbrennweite f_1/Okularbrennweite f_2.
Beim „*holländischen* (*Galilei*-) *Fernrohr*“ (Abb. 2) ist das Okular eine Zerstreuungslinse. Dieses System liefert ein aufrechtstehendes Bild, es wird besonders für Theatergläser mit geringer Vergrößerung (meist 2,5fach) verwendet.
Das „*astronomische* (*Keplersche*) *Fernrohr*“ (Abb. 3) hat als Okular ein sammelndes System. Daß hier bei der Zwischenabbildung ein reelles Bild entsteht, hat einen großen Vorteil: Alles, was sich in dieser Ebene befindet, erscheint dem Auge scharf und im Unendlichen liegend. Deshalb bringt man hier eine Gesichtsfeldblende an, die dem übersehbaren Raum im Unendlichen eine scharfe Begrenzung gibt, dazu entsprechend dem Verwendungszweck gegebenenfalls auch ein Fadenkreuz, einen Glasmaßstab o. ä. Das kopfstehende Bild stört bei der Himmelsbeobachtung nicht, für die Verwendung auf der Erde muß es durch eine weitere Zwischenabbildung umgekehrt werden. Zu diesem Zweck hat das „terrestrische Fernrohr“ zwischen Objektiv und Okular noch eine weitere Sammellinse (Abb. 4). Bei der Abbildung 1 : 1 sind Gegenstandsweite und Bildweite beide gleich der doppelten Brennweite, das ganze Fernrohr wird sehr lang, nämlich $l = f_1 + 4f_u + f_2$. Für den Handgebrauch baute man es deshalb mit ineinanderschiebbaren Rohren; das Prismenfernglas (s. S. 392) hat diese Bauart ersetzt.
Da sich Linsen nur bis zu Durchmessern von etwa 1 m herstellen lassen, wird bei großen astronomischen Fernrohren ein Hohlspiegel als Objektiv verwendet (Spiegeldurchmesser des Teleskops auf dem Mount Palomar 5 m). Abb. 5 zeigt das Prinzip des Spiegelteleskops, Abb. 6 ein Beispiel für eine Kombination aus konkavem Hauptspiegel und gewölbtem Fangspiegel; die Baulänge ist sehr kurz.
Für photographische Aufnahmen des Sternhimmels wird die Platte direkt in die Bildebene des Objektivs gebracht.
Die kurze Bauweise des Spiegelteleskops hat auch schon in die normale Photographie Eingang gefunden. Abb. 7 zeigt ein an einer Kleinbildkamera zu verwendendes Spiegelobjektiv von 500 mm Brennweite mit der Lichtstärke 1 : 4,5. Es besteht aus zwei Glasspiegeln und vier schwach brechenden Korrektionslinsen.

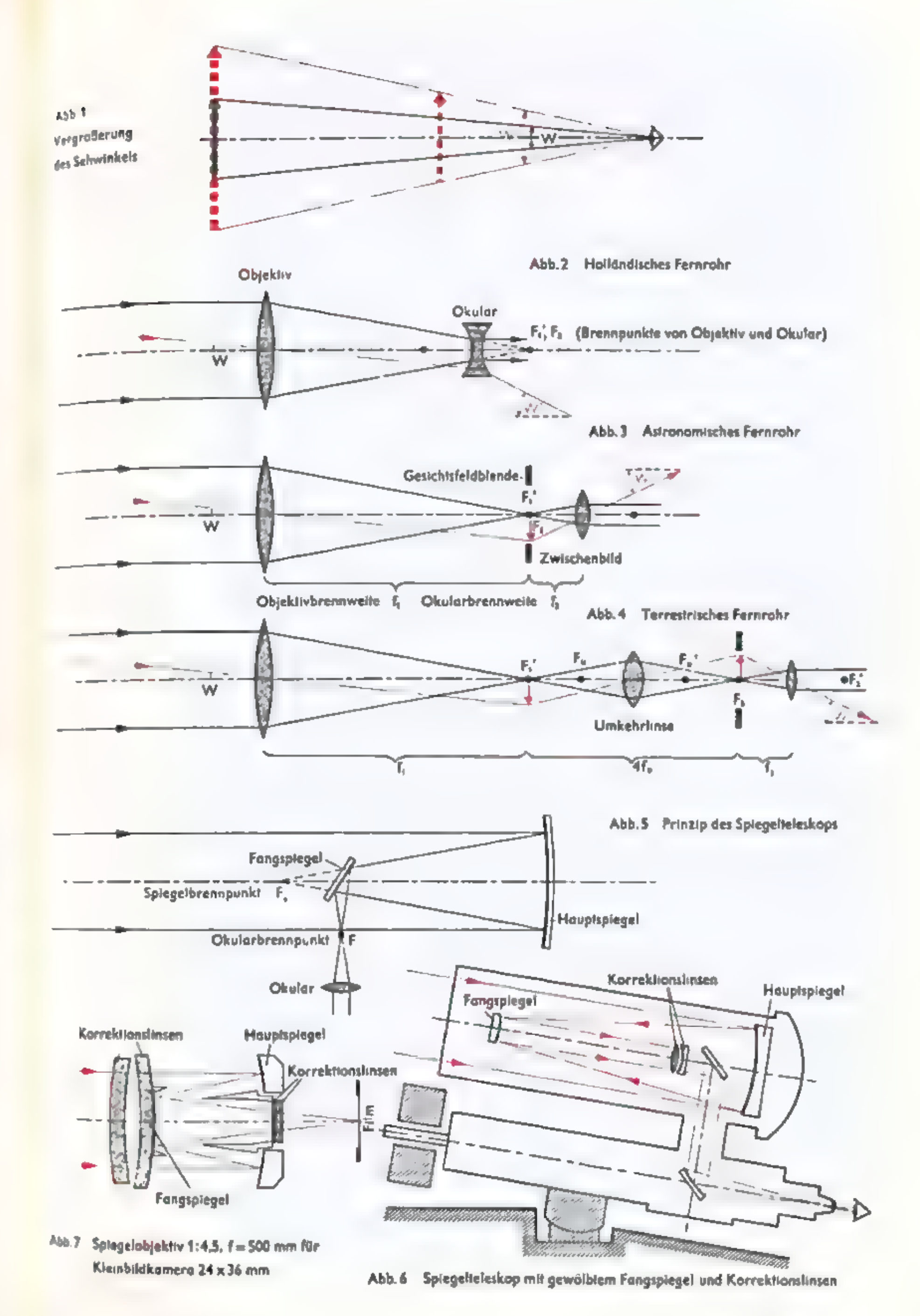


Abb. 1 Vergrößerung des Sehwinkels

Abb. 2 Holländisches Fernrohr

Abb. 3 Astronomisches Fernrohr

Abb. 4 Terrestrisches Fernrohr

Abb. 5 Prinzip des Spiegelteleskops

Abb. 7 Spiegelobjektiv 1:4,5, f = 500 mm für Kleinbildkamera 24 x 36 mm

Abb. 6 Spiegelteleskop mit gewölbtem Fangspiegel und Korrektionslinsen

FERNROHRE II (PRISMENFERNGLAS)

Das Prismenfernglas (Prismenfernrohr, Feldstecher) besteht wie das astronomische Fernrohr (s. S. 390) aus Objektiv und Okular. Das astronomische Fernrohr allein ergibt aber ein kopfstehendes Bild; zur Umkehrung dieses Bildes werden nun Prismen benützt. Abb. 1 zeigt, wie ein Strahlenbündel durch Totalreflexion in einem Prisma zweimal im rechten Winkel abgelenkt wird, so daß danach Oben und Unten vertauscht sind. Da bei dem kopfstehenden Bild im Fernrohr auch Links und Rechts vertauscht waren, muß der Strahlengang noch ein zweites Prisma durchlaufen (Abb. 2), damit auch die Seitenrichtigkeit wiederhergestellt ist. Diese Prismenanordnung spart gegenüber dem terrestrischen Fernrohr (s. S. 390) nicht nur die wegen der Umkehrabbildung größere Rohrlänge, sondern hat durch den dreifach nebeneinandergelegten Strahlengang eine nochmals wesentlich verkürzte Baulänge. Der gegenüber dem Augenabstand vergrößerte Objektivabstand ist für das räumliche Sehen von Vorteil. In dem Schnittbild 4 ist an der Vereinigung des Strahlenbündels der Ort der Zwischenabbildung kurz vor dem Okular erkennbar. Hier befindet sich auch die Gesichtsfeldblende, die als scharfer Rand des Bildfeldes im Unendlichen gesehen wird.

Die Vergrößerung (vgl. auch S. 390; ebenso gilt das Folgende für *alle* Arten von Fernrohren) wird auf jedem Fernglas angegeben, z. B. 8× (achtmal). Daß die nächste wichtige Zahlenangabe daran angeschlossen ist, ist etwas irreführend; diese zweite Angabe nennt nämlich den Objektivdurchmesser in mm, z. B. „8×30". Dies bedeutet aber nicht, daß eine Multiplikation durchzuführen wäre. Im Gegenteil, den interessierenden Wert erhält man durch Division: $30/8 = 3{,}75$. Er besagt, daß das Strahlenbündel mit 3,75 mm Durchmesser aus der Austrittspupille, die ja das Bild der achtmal größeren Eintrittspupille ist, kommt. Beide Pupillen kann man sehen, wenn man aus etwa 30 cm Abstand in das Okular oder das Objektiv blickt. Auch beim Auge wird die Lichtstärke durch die Pupille geregelt; bei schwachem Licht kann sie 8 mm Durchmesser haben, bei heller Sonne wird sie bis auf 1,5 mm verkleinert. Die Lichtstärke eines Fernglases wird also am besten ausgenützt, wenn das Strahlenbündel gerade den Durchmesser der Augenpupille hat. Ein sog. „Nachtglas" hat z. B. die Daten 7×50, also siebenfache Vergrößerung und eine Eintrittspupille von 50 mm Durchmesser. Bei Mondbeleuchtung geht das Bündel vollständig ins Auge über (Abb. 3a). Benützt man aber das Glas am hellen Nachmittag, dann hat die Augenpupille vielleicht 2 mm Durchmesser (Abb. 3b) und nur $1/_{13}$ der Lichtstärke wird ausgenützt. Da die durchtretende Lichtmenge der Fläche der Öffnung proportional ist, bezeichnet man die Lichtstärke beim Fernglas mit dem Quadrat des Durchmessers der Austrittspupille, z. B. $7{,}14 \times 7{,}14 = 51{,}5$.

In der Dämmerung werden Gegenstände um so besser erkannt, je größer und je heller sie erscheinen. Nach der Erfahrung steigt die Erkennbarkeit etwa mit der Wurzel aus dem Objektivdurchmesser und der Vergrößerung; die Wurzel aus dem Produkt beider Werte wird deshalb gelegentlich als „Dämmerungszahl" angegeben, z. B.:

$$\sqrt{30 \times 8} = 15{,}5; \quad \sqrt{50 \times 7} = 18{,}7.$$

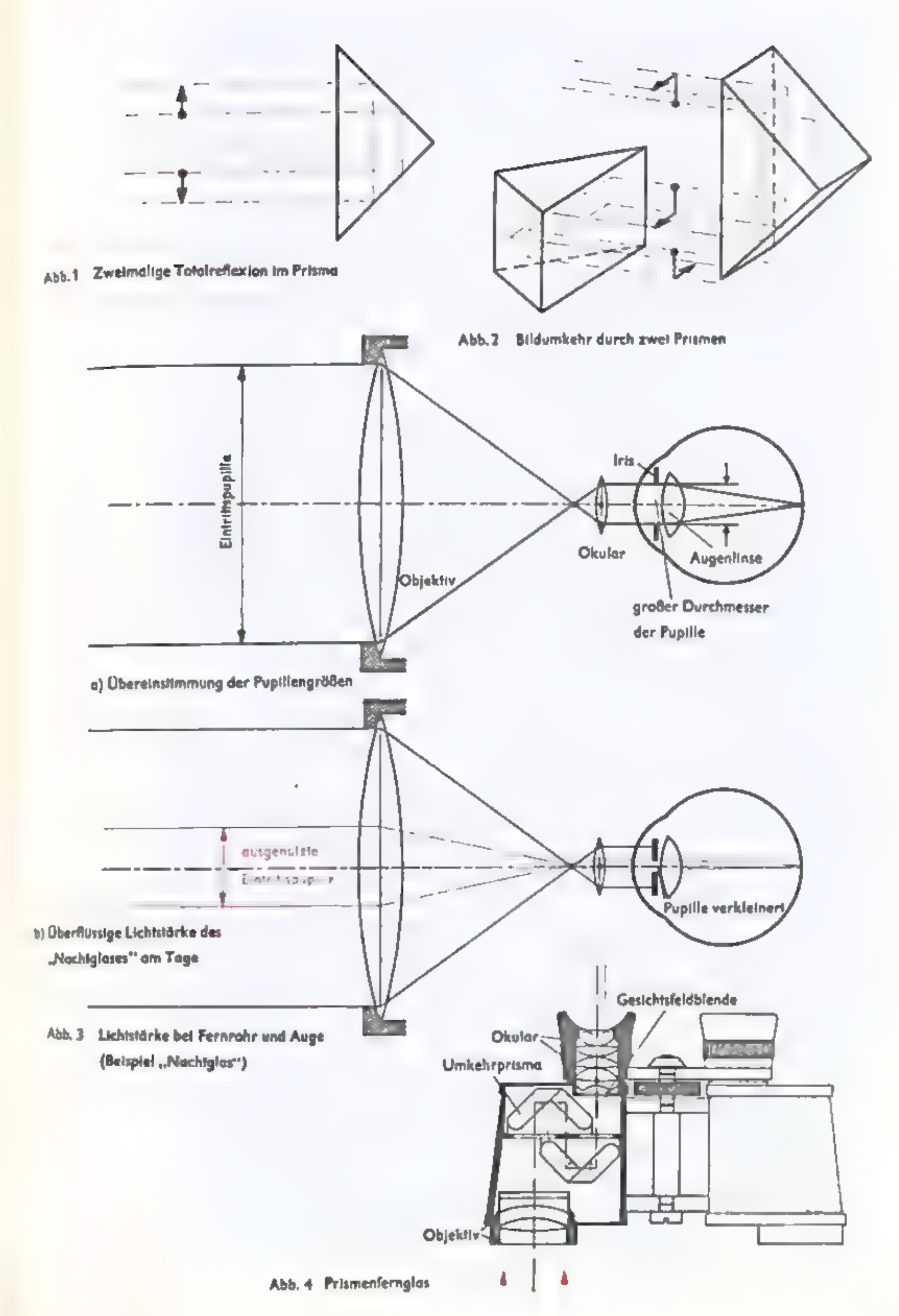


Abb. 1 Zweimalige Totalreflexion im Prisma

Abb. 2 Bildumkehr durch zwei Prismen

a) Übereinstimmung der Pupillengrößen

b) Überflüssige Lichtstärke des „Nachtglases" am Tage

Abb. 3 Lichtstärke bei Fernrohr und Auge (Beispiel „Nachtglas")

Abb. 4 Prismenfernglas

PHOTOAPPARATE (ÜBERSICHT)

Photoapparate sind Vorrichtungen, bei denen mit Hilfe einer Öffnung in einem lichtdichten Gehäuse auf einer der Öffnung gegenüberliegenden lichtempfindlichen Schicht ein reelles Bild des aufzunehmenden Gegenstandes entworfen wird. Sie bestehen prinzipiell aus einem lichtdichten Gehäuse mit der Bildbühne und der Aufbewahrungs- bzw. Transporteinrichtung für das lichtempfindliche Material. Das Gehäuse ist zur Einhaltung und Einstellung der erforderlichen Bildweiten zum Objektiv hin durch einen (versenkbaren) Tubus *(Tubuskamera)* oder einen Balgen *(Balgenkamera)* verlängert. Die ursprüngliche Kastenform der Camera obscura hat nur die früher beliebte einfache Boxkamera. Im Objektiv ist in der bildseitigen Hauptebene eine Aperturblende angebracht, die die wirksame Linsenfläche begrenzt. Die Belichtungszeit wird durch einen sich (kurzzeitig) öffnenden und schließenden Verschluß geregelt, der als Zentralverschluß zweckmäßig nahe der Blendenebene angeordnet ist, wo der kleinste Öffnungsdurchmesser erforderlich ist, sich als Hinterlinsenverschluß jedoch auch im Tubus bzw. an der Vorderwand des Gehäuses befinden kann, wodurch das Auswechseln des Objektivs unter Beibehaltung des Verschlusses ermöglicht wird. Bei Kameras mit Satzobjektiven ist außer dem Zentralverschluß auch das gemeinsame Hinterglied der Wechselobjektive Bestandteil der Kamera. Der Schlitzverschluß befindet sich unmittelbar vor der Bildebene.

Bildbeobachtung und Entfernungseinstellung erfolgen nach zwei unterschiedlichen Prinzipien: 1. Es wird das erzeugte reelle Bild betrachtet, entweder auf einer in der Bildebene angebrachten Mattscheibe *(Mattscheibenkamera)* oder unter Zwischenschaltung eines Ablenkspiegels auf einer zur Bildebene konjugierten Ebene *(Spiegelreflexkamera)*; 2. Es wird durch eine optische Visiereinrichtung unmittelbar das Motiv betrachtet und die Motiventfernung gegebenenfalls optisch gemessen *(Sucherkamera)*. Die Einstellung nach dem kopfstehenden und seitenverkehrten Mattscheibenbild ist v. a. bei Großformatkameras gebräuchlich, da sie die exakte Beurteilung von Allgemeinschärfe, Schärfentiefe, Bildauszeichnung, Perspektive und Parallelität senkrechter Linien auch bei extremen Kameraverstellungen erlaubt. Vor der Aufnahme muß die Mattscheibe gegen die Kassette mit dem Aufnahmematerial ausgetauscht werden. Bei Spiegelreflexkameras kann sich der Ablenkspiegel im Strahlengang des bilderzeugenden Objektivs befinden *(einäugige Spiegelreflexkamera)*, er wird dann vor der Aufnahme aus dem Strahlengang geschwenkt. Um die unvermeidliche Dunkelphase bei der Bildbeobachtung zu verkürzen, ist der Spiegel bei kleineren Formaten zumeist als *Schwingspiegel (Rapidspiegel)* ausgebildet, der nach der Belichtung sofort in die Ausgangsstellung zurückkehrt. Die Erschütterungen, die durch die Spiegelbewegung hervorgerufen werden und zu Bildunschärfen führen können, müssen durch Anschlagpolster, federnde Abfangstege, auch durch die Bewegung des Spiegels über ein Kurbelschleifengetriebe neutralisiert werden. Das Bild wird auf einer meist horizontalen Mattscheibe aufgefangen, die häufig gegen andere Einstellscheiben austauschbar ist. Es wird durch einen Sucherlichtschacht betrachtet, der gegen Störlicht abschirmt. Das Bild ist aufrecht und seitenverkehrt, jedoch kann der Strahlengang durch ein aufgesetztes oder fest eingebautes Umkehrprisma (Pentaprisma) so umgekehrt werden, daß man ein (lotrechtes) aufrechtes und seitenrichtiges Bild erblickt. Da die Scharfeinstellung bei offener Blende (geringste Schärfentiefe) vorgenommen werden muß, muß die Blende vor der Belichtung (automatisch) auf den vorgewählten Wert geschlossen werden. Einige Kamerakonstruktionen besitzen statt des beweglichen Spiegels starre teildurchlässige Spiegel oder Strahlenteilungsprismen. Damit entfallen die Nachteile der Spiegelbewegung, jedoch vermindert sich der Lichtdurchlaß auf die Hälfte. Bei der *zweiäugigen Spiegelreflexkamera* wird das Mattscheibenbild durch ein separates optisches System entworfen, das zusammen mit dem Aufnahmeobjektiv eingestellt wird.

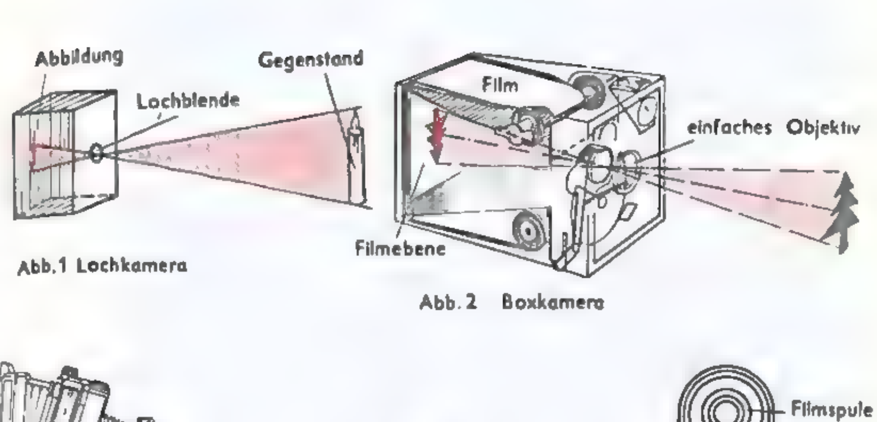


Abb. 1 Lochkamera

Abb. 2 Boxkamera

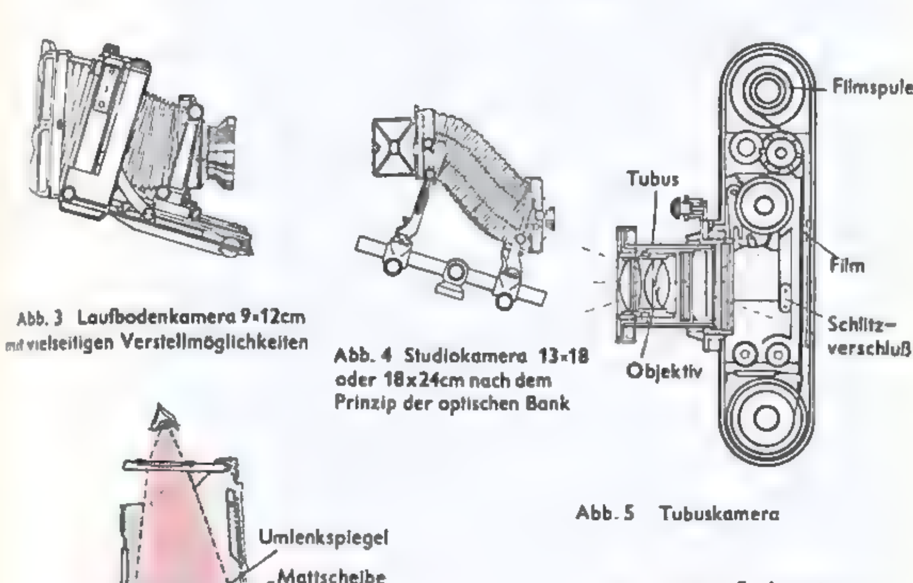


Abb. 3 Laufbodenkamera 9×12cm mit vielseitigen Verstellmöglichkeiten

Abb. 4 Studiokamera 13×18 oder 18×24cm nach dem Prinzip der optischen Bank

Abb. 5 Tubuskamera

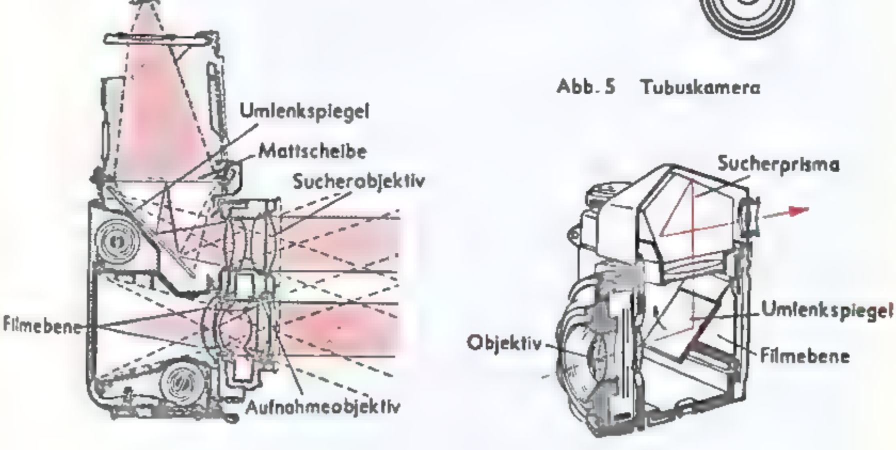


Abb 6 Zweiäugige Spiegelreflexkamera

Abb. 7 Einäugige Spiegelreflexkamera

PHOTOGRAPHISCHE OBJEKTIVE I

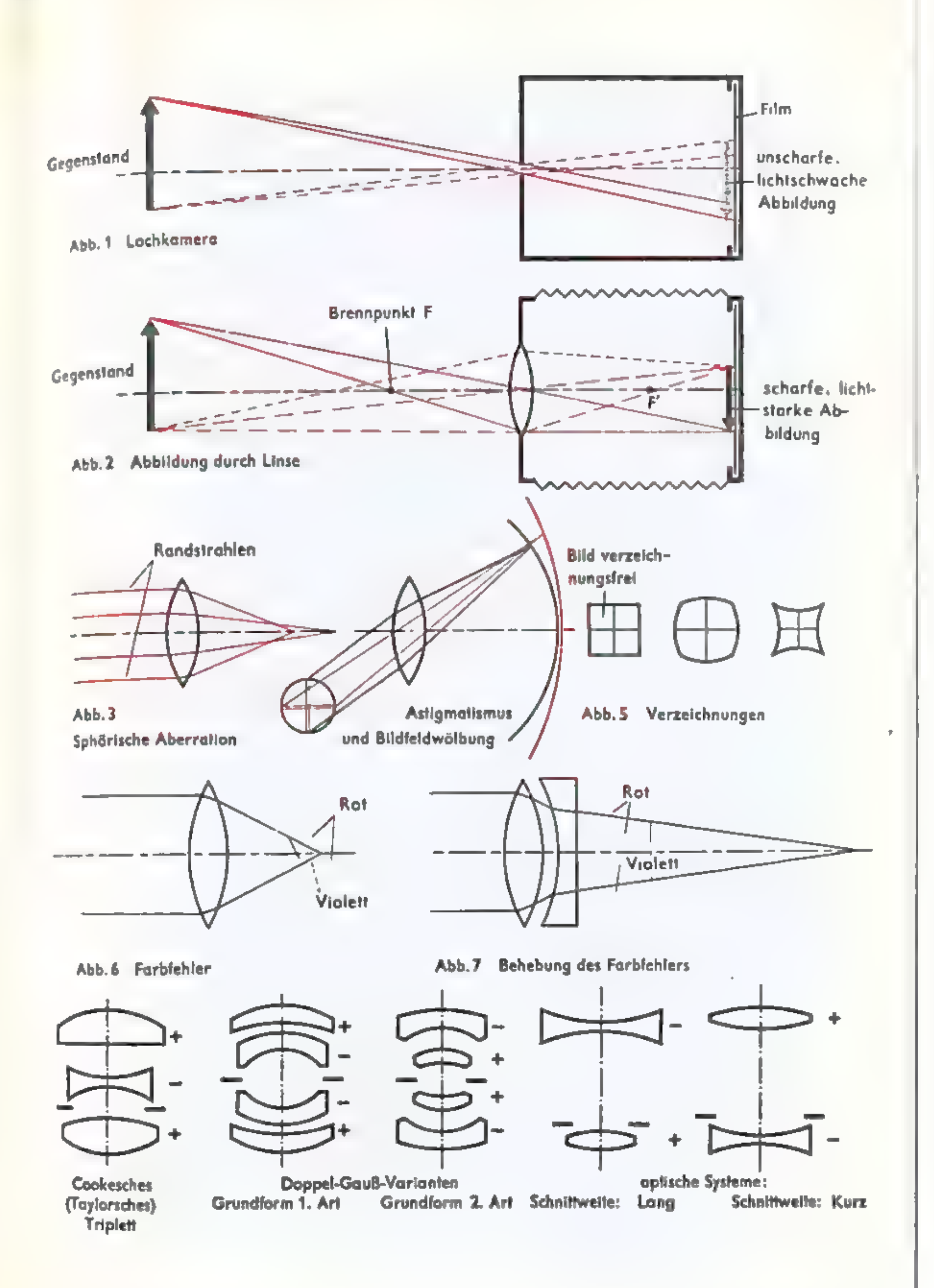
Der wichtigste Bestandteil eines Photoapparates ist das Objektiv. Es soll von dem abzubildenden Gegenstand ein über das ganze Aufnahmeformat scharfes, ebenes, maßgetreues und helles Bild entwerfen.

Das einfachste Objektiv ist ein sehr kleines Loch, das dank der geradlinigen Ausbreitung des Lichts eine Abbildung vermittelt (Abb. 1). Jedoch sind Aufnahmen mit der „Lochkamera" nicht besonders scharf, da ein Punkt nur als Scheibe wiedergegeben wird, die nie kleiner als das Loch sein kann. Wegen der sehr kleinen Öffnung ist auch die Lichtstärke äußerst gering.

Durch ihre Fähigkeit, Strahlen eines größeren Bündels in einem Punkt zu vereinigen, erscheinen Linsen für eine scharfe, lichtstarke Abbildung geeignet. Abb. 2 zeigt schematisch den Vorgang der Bildentstehung nach den Abbildungsgesetzen (s. Linsen S. 166). Da jedoch Lichtstrahlen, besonders wenn sie von einem Punkt weiter abseits der optischen Achse herkommen, ganz verschiedene Wege in Luft und Glas zurücklegen, je nachdem an welcher Stelle und unter welchem Winkel sie auf die Linse treffen, erfolgt ihre Vereinigung nicht mehr ideal in einem Punkt. Die Abweichungen von der idealen Abbildung werden als Linsenfehler bezeichnet. Die Hauptfehler sind: sphärische Aberration oder Öffnungsfehler (Abb. 3; die Randstrahlen treffen sich in einem der Linse nähergelegenen Punkt), Astigmatismus und Bildfeldwölbung (Abb. 4; zueinander senkrecht liegende, schräg durch eine Linse fallende ebene Strahlenbüschel werden auf zwei verschiedenen gewölbten Schalen vereinigt), Koma (kometenhaft verbreiterte Punkte außerhalb der Bildmitte), Verzeichnung (Abb. 5), chromatische Aberration oder Farbfehler (Abb. 6; Licht größerer Wellenlänge wird weniger stark gebrochen als kürzerwelliges Licht).

Kombiniert man nun mit einer Sammellinse eine Zerstreuungslinse, die ihrer Form nach nur eine halb so große (negative) Brechkraft hat, aber aus Glas doppelt so großer Dispersion (Farbzerstreuung) hergestellt ist, so wird die Brechkraft der Kombination halbiert, die Farbfehler werden aber ganz aufgehoben (Abb 7). Ein solches Objektiv heißt *Achromat*, es wird meist verkittet hergestellt (Abb. 8) und mit Öffnungen bis 1:9 für Boxkameras verwendet. In ähnlicher Weise geht der Optikrechner auch gegen die anderen Abbildungsfehler vor. Ihm stehen dafür mehrere hundert Glassorten mit unterschiedlicher Brechzahl und Dispersion zur Verfügung. Durch Variation der Anzahl der Linsen, ihres Glases, der Krümmungsradien, der Linsendicken und der Luftabstände werden die Fehler auf ein unschädliches Maß verringert.

Bei allen lichtstarken Objektiven muß neben den anderen Fehlern besonders der Astigmatismus behoben sein, sie heißen dann „Anastigmate". Neben dem „klassischen" *Triplett* (Cookesches Triplett) als Konstruktionstyp für Standardobjektive und mittlere Brennweiten stehen v. a. die aus dem Gauß-Typ entwickelten *Doppel-Gauß-Varianten* in zwei Abwandlungsformen: als *Doppel-Gauß-Variante 1. Art* für Normalbrennweiten höchster Lichtstärke, als *Variante 2. Art* mit stärkerer Einschnürung in den Hauptebenen für Weitwinkel- und Superweitwinkelobjektive. Mit den Gauß-Konstruktionen lassen sich durch den Einsatz neuartiger Gläser (sogenannter LaSF- und SF-Gläser mit Brechzahlen zwischen 1,85 und 1,96 und Abbeschen Zahlen zwischen 40 und 20) und asphärische Gestaltung der Front- und der Hinterfläche des Linsensystems Lichtstärken bis zu 1:1,2 bei einem Bildwinkel von 46° erreichen. Wichtige Objektivtypen sind ferner *optische Systeme mit veränderter Schnittweite*, modifizierte Gauß- und Triplettkonstruktionen, bei denen die Brechkraft innerhalb des Systems so verteilt ist, daß die Schnittweite (Abstand zwischen Hinterlinsenscheitel und Bildebene) entweder länger oder kürzer als die Brennweite ist.



PHOTOGRAPHISCHE OBJEKTIVE II

Durch die streuende Wirkung des Vordergliedes und die sammelnde Wirkung des Hintergliedes wird erreicht, daß die bildseitige Hauptebene hinter den Hinterlinsenscheitel zu liegen kommt. Die Schnittweitenverkürzung wird durch die umgekehrte Anordnung von zerstreuenden und sammelnden Elementen erreicht (Prinzip des holländischen Fernrohrs); die bildseitige Hauptebene liegt dabei vor der Frontlinse, was bei langen Brennweiten zu einer erheblichen Verkürzung der Baulänge führt (sogenannte *echte Teleobjektive*) und besonders bei Teleobjektiven für Hinterlinsenverschlußkameras erforderlich ist, damit der Verschluß die günstigste Lage unmittelbar hinter dem hinteren Linsenscheitel beibehält. Bei Kameras mit Zentralverschlüssen besteht auch die Möglichkeit, ein gemeinsames Hinterglied für mehrere Brennweiten zu verwenden, so daß dieses mit dem Verschluß bei der Kamera verbleiben kann und nur die Vorderglieder ausgetauscht werden (sogenanntes *Satzobjektiv*). Hierbei nimmt der Verschluß immer die günstigste Lage in der bildseitigen Hauptebene (Blendenebene), d. h. am Ort der engsten Einschnürung des Strahlengangs, ein. *Wechselobjektive ohne Nebenbedingung* werden an Schlitzverschlußkameras verwendet; bei Groß- und Mittelformatkameras besitzt jedes Wechselobjektiv einen eigenen Zentralverschluß. — Für spezielle Aufgaben (Reproduktionsphotographie) werden auch Objektivtypen mit besonderer Korrektion für den Nahbereich verwendet, z. B. das apochromatisch korrigierte symmetrische *Dialyt* (Doppelanastigmat). Einen abweichenden Typ (komplementäres Triplett) stellt auch das dreilinsige Hologon ® mit einem Bildwinkel von 110° dar. Anamorphoten werden bei den verschiedenen Breitbildverfahren, neuerdings auch in der Kleinbildprojektion zur Vergrößerung der Bildbreite verwendet. Objektive mit veränderlicher Brennweite *(pankratische Systeme)*, sogenannte Vario- oder Zoomobjektive, sind Systeme von 10 bis 15 Linsen. Durch zwei verschiebbare (negative) Linsenglieder wird der Charakter entweder des Vordergliedes oder des Hintergliedes und damit die Brennweite kontinuierlich verändert. Varioobjektive haben einen mittleren Brennweitenbereich, der mit Tele-, Weitwinkel- oder Makrovorsätzen (für Nahaufnahmen) erweitert werden kann. Sie werden oft mit negativer Bild(feld)-wölbung zur Rückverlagerung der Schärfe am Bildrand (Erhöhung der Schärfentiefe) konstruiert. Weitere Spezialobjektive sind *Makroobjektive*, kurzbrennweitige Objektive mit erweitertem Auszug (und Blendenkorrektur) für Nahaufnahmen ohne bildweitenverlängernde Elemente, Weitwinkelobjektive mit exzentrisch verstellbarer optischer Achse zum Ausgleich stürzender Linien in der Kleinbildphotographie u. a.

Wechselobjektive werden mit Schraubgewinde (für Kleinbild-Spiegelreflexkameras meist Gewinde M 42 × 1, sogenannte Praktica-Gewinde) oder mit einer Bajonetthalterung (über Adapter auch wahlweise) an die Kamera angeschlossen. Die Entfernungseinstellung geschieht beim einfachen Triplett durch axiale Verschiebung der Frontlinse, im allgemeinen durch axiales Verschieben des ganzen Systems mit Hilfe des Tubusschneckengangs oder des Laufbodentriebs. Für hauptsächlich im Nahbereich eingesetzte Objektive kommt auch eine Innenverstellung (Mittelgliedverstellung) wie beim Varioobjektiv in Frage, durch die gleichzeitig die Korrektion dem Nahbereich angepaßt wird. Einander berührende Linsenoberflächen sind mit einer Kittmasse gleicher Brechzahl (Kanadabalsam) verkittet, die freien Linsenoberflächen sind vergütet. In der bildseitigen Hauptebene des Objektivs ist eine Aperturblende (Irisblende) sowie bei nicht auswechselbaren Objektiven der Zentralverschluß angeordnet. Bei Spiegelreflexobjektiven bis zu mittlerer Brennweite wird die Blende meist automatisch betätigt.

Schlitz-verschluß
Blende
Bildebene

a) Summaron 1:2,8, f = 35 mm — b) Elmar 1:2,8; f = 50 mm — c) Elmar 1:4; f = 90 mm

Abb. 1 Wechselobjektive ohne Nebenbedingung
Leitz-Objektive zur Leica

a) Eurygon 1:4; f = 35 mm — b) Ysarex 1:2,8; f = 50 mm — c) Rotelar 1:4; f = 85 mm

Abb. 2 Rodenstock - Wechselobjektive für nachgesetzten Zentralverschluß (und/oder Spiegelreflexkameras)

Bildebene

a) Pantar in Weitwinkelkombination 1:4; f = 30 mm — b) Pantar 1:2,8; f = 45 mm Zeiss — c) Pantar in Telekombination 1:4; f = 75 mm

Abb. 3 Satzobjektiv: Nur die Vorderlinse (Vorderglied) wird gegen ein Linsensystem ausgetauscht

Filmebene

Zoomar (Voigtländer); 1:2,8; f = 36 bis 82 mm;
hier in Telestellung 82 mm, durch Verschieben der beiden schraffierten Glieder in Pfeilrichtung wird die Brennweite kontinuierlich verkürzt.

Abb. 4 Objektiv mit stufenlos veränderlicher Brennweite für Spiegelreflexkameras mit nachgesetztem Zentralverschluß oder Schlitzverschluß

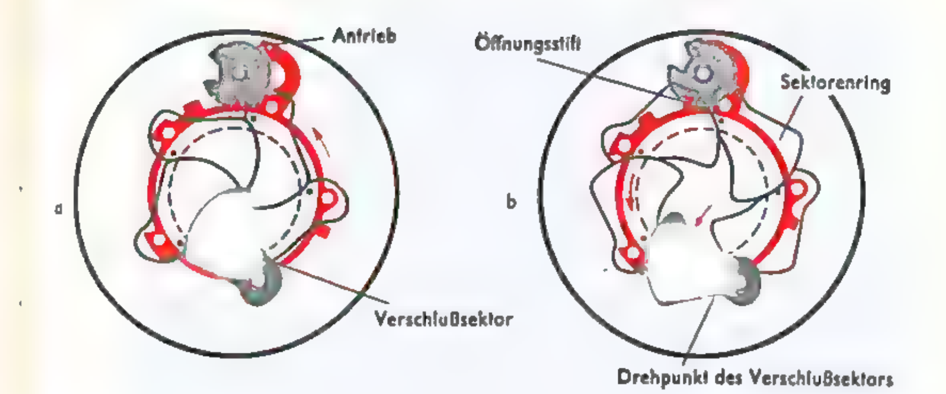
VERSCHLÜSSE MIT BLITZSYNCHRONISATION I (ZENTRALVERSCHLUSS)

Der Verschluß der photographischen Kamera hat die Aufgabe, den Lichtstrahlen für eine einstellbare Zeit den Weg zum Film freizugeben. Der *Zentralverschluß* (Lamellenverschluß) ist die häufigste Bauart des Verschlusses an photographischen Apparaten, bei der mehrere dünne Stahlfolien (Verschlußlamellen, Verschlußsektoren) mit kurvenförmiger Begrenzung die Verschlußöffnung abdecken und bei der Belichtung so um feste Drehpunkte geschwenkt werden, daß sie die Öffnung von der Mitte her beginnend (kurzzeitig) freigeben (Abb. 1). Die Lamellen werden dabei von den in Langlöchern gleitenden Führungsstiften des Sektorenrings bewegt, der von der umlaufenden Nockenscheibe des Federwerkantriebs mitgenommen wird. Nach Ablauf der eingestellten Offenzeit drückt der Schließstift der Nockenscheibe gegen den Mitnehmer, der den Sektorenring in die Ausgangsstellung zurückführt. Bei einfachen, selbstspannenden Automatverschlüssen wird das die Nockenscheibe antreibende Federwerk beim Auslösen gespannt; andere Verschlüsse müssen zunächst „aufgezogen" werden, wobei der Verschlußaufzug häufig mit der Filmtransporteinrichtung gekoppelt ist. Die effektive Belichtungszeit setzt sich aus der Volloffenzeit und jeweils der Hälfte der zum Öffnen und zum Schließen benötigten Zeitspannen zusammen (im Idealfall streng gleichförmiger Bewegungen). Bei längeren Belichtungszeiten wird die Nockenscheibe durch ein zuschaltbares Hemmwerk (bei mechanischen Verschlüssen ein Flügelrad- oder Ankerhemmwerk) gehemmt, bei kurzen Belichtungszeiten durch eine zusätzliche Spannfeder beschleunigt. Bei elektronischen Verschlüssen wird der Schließvorgang durch einen Elektromagneten bewerkstelligt, die Offenzeit wird durch die Aufladungszeit von zuschaltbaren Kondensatoren bestimmt. Zentralverschlüsse werden zweckmäßig am Ort der engsten Einschnürung des Strahlenbündels angeordnet, damit ihre Dimensionen klein gehalten werden können. Sie befinden sich als *Zwischenlinsenverschlüsse (Objektivverschlüsse)* in der bildseitigen Hauptebene des Objektivs (Blendenebene), als Hinterlinsenverschlüsse unmittelbar hinter dem Hinterlinsenscheitel; im letzteren Fall gestatten sie das Auswechseln des gesamten Objektivs. Bei dem Zentralverschluß einer einäugigen Spiegelreflexkamera ist zusätzlich zum Verschlußantrieb eine Steuerung der Lamellen erforderlich, die den Verschluß zur Bildeinstellung offenhält; das Kamerainnere ist währenddessen durch die Lichtschutzklappe des Reflexspiegels abgeschlossen. Bei der Belichtung werden zunächst die Lamellen geschlossen, Spiegel und Lichtschutzklappe aus dem Strahlengang entfernt und danach der Verschlußablauf bewerkstelligt. Mit der Rückkehr des Spiegels in die Ausgangsstellung öffnen sich die Lamellen wieder.

Der Öffnungs- und Schließvorgang allein dauert je etwa 2 ms (²/₁₀₀₀ s; Abb. 2 a); in dieser Zeit tritt durch das Objektiv so viel Licht wie in je 1 ms bei voll geöffnetem Verschluß. Die durch das Hemmwerk regulierte „Offenzeit" ist demnach etwa 2 ms kürzer als die eingestellte Belichtungszeit. Bei ganz kurzen Belichtungszeiten (¹/₅₀₀ s; Abb. 2 b) ist das Hemmwerk ausgeschaltet und eine zusätzliche Spannfeder beschleunigt den Ablauf noch mehr.

Bei eingebautem Selbstauslöser wird beim Auslösen erst das „Vorlaufwerk" in Gang gesetzt, das dann nach 5 bis 10 s den Sektorenablauf einleitet.

Bei Blitzaufnahmen muß das Aufleuchten des Blitzes mit der Öffnung des Verschlusses „synchronisiert" werden. Die meisten Verschlüsse haben den X-Kontakt, der beim Erreichen der vollen Öffnung Kontakt gibt (Elektronenblitz). „Vollsynchronisierte" Verschlüsse haben zusätzlich den M-Kontakt, der 16 ms eher zündet, damit die etwas trägeren Kolbenblitze bis zur Verschlußöffnung ihren größten Lichtstrom erreichen.



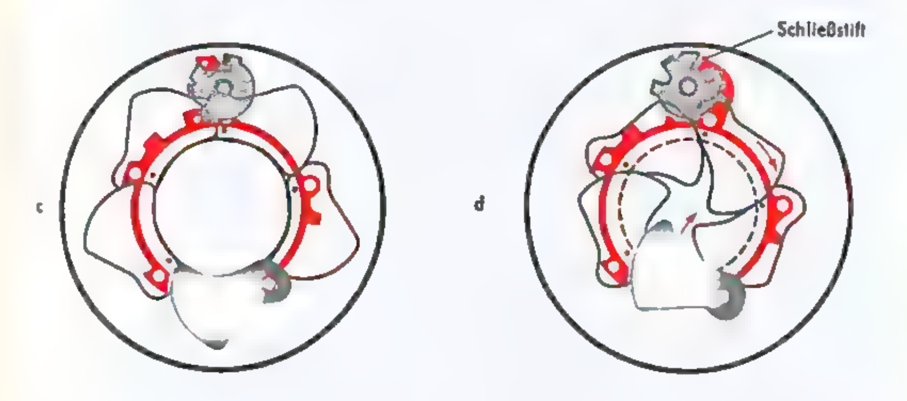


Abb. 1 Bewegungsablauf eines Verschlußsektors

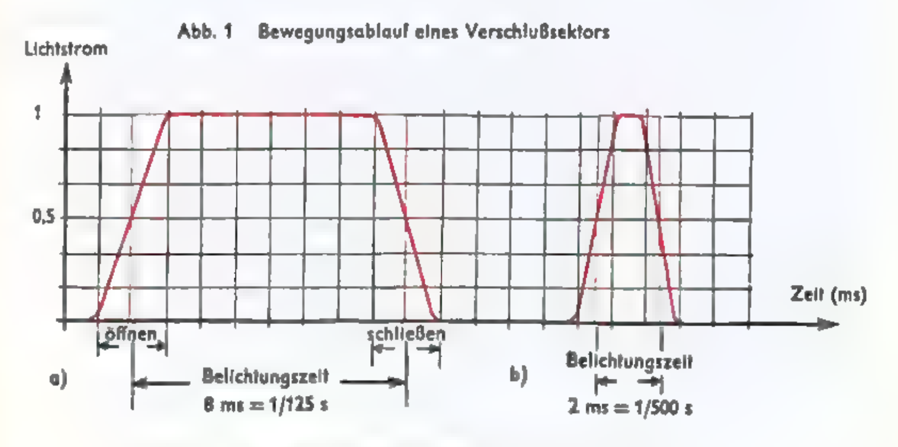


Abb. 2 Lichtstrom-Zeit-Diagramm eines Zentralverschlusses

VERSCHLÜSSE MIT BLITZSYNCHRONISATION II

Sollen an einer Kamera Objektive kürzester wie längster Brennweite gegeneinander austauschbar sein, soll die Kamera mit Zwischenringen und Balgengerät oder am Mikroskop verwendet werden, so muß sie mit einem Verschluß ausgerüstet sein, der sich dicht vor dem Film bewegt. Solche Systemkameras haben deshalb Schlitzverschlüsse.

Diese bestehen aus zwei lichtundurchlässigen Vorhängen, die sich in der gleichen Führungsbahn bewegen (Abb. 1). Beim Auslösen wird der erste Vorhang weggezogen und durch eine Feder auf einer Spule aufgerollt. Der zweite Vorhang folgt nach einer bestimmten Zeit mit der gleichen Geschwindigkeit und deckt den Film wieder ab. Durch die beiden Vorhänge wird somit ein Schlitz gebildet, der über den Film wegläuft. Hat man also eine lange Belichtungszeit eingestellt (Abb. 2), so wartet der zweite Vorhang lange, bis er dem ersten nacheilt; der Schlitz ist sehr breit. Bei kurzen Zeiten eilt er sofort hinterher, der Schlitz ist sehr schmal (Abb. 3).

Für die Laufrichtung der Vorhänge gibt es zwei Möglichkeiten: Sie können entweder wie in Abb. 1 das 36 mm breite Bildfeld in Längsrichtung überstreichen, oder wie in der Ausführungsform der Abb. 4 quer über die breite Seite des Formats laufen, wobei ihr Weg dann nur 24 mm beträgt. Meist sind diese Schlitzverschlüsse für Belichtungszeiten bis zu 1/1000 s eingerichtet. Diese kurzen Zeiten werden aber – wie erwähnt – bei etwa gleichbleibender Laufgeschwindigkeit nur durch Verringerung der Schlitzbreite erzielt, der ganze Verschlußablauf dauert wesentlich länger. Wenn sich nun ein aufzunehmender Gegenstand mit sehr großer Geschwindigkeit vor der Kamera vorbeibewegt, so kann sein Bild mit dem Schlitz etwas „mitlaufen" oder ihm „entgegenlaufen", was zu einer gedehnten oder verkürzten Abbildung führen würde. Bei früheren großformatigen Kameras wurden solche Verzerrungen tatsächlich beobachtet. Bei modernen Kleinbildkameras aber braucht der Schlitz von einem Ende des Bildfeldes bis zum anderen weniger als 1/50 s. Ein Rennwagen würde also um 10% verzerrt, wenn er in 1/5 s das ganze Bildfeld durchraste (bei Normaloptik 50 mm und 50 m Abstand hieße das 36 m in 1/5 s oder 648 km/Stunde!).

Die kurze Laufzeit des Verschlusses ist jedoch sehr wichtig für die Blitztechnik: Bei kurzen Belichtungszeiten an der Kamera muß die Helligkeit der Blitzlampe so lange etwa gleich groß bleiben, wie der schmale Schlitz braucht, um das ganze Bildfeld zu überstreichen. Bei sehr kurz brennenden Blitzlampen und besonders bei Elektronenblitzen würde nur der schmale Streifen Film belichtet, vor dem sich der Schlitz im Augenblick des Aufflammens befindet. Zur Synchronisation mit diesen Blitzen muß man deshalb die Verschlußzeit einstellen, bei der die Schlitzbreite gerade noch größer als das ganze Filmfenster ist. Diese Zeit beträgt bei neueren Kameras etwa 1/60 s — 1/125 s.

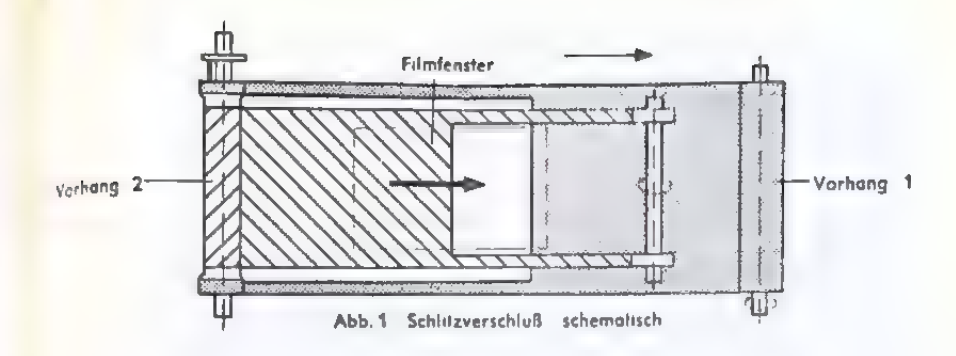


Abb. 1 Schlitzverschluß schematisch

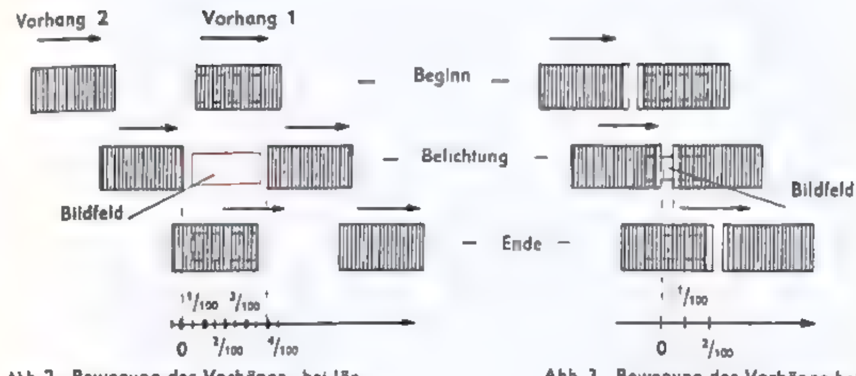


Abb. 2 Bewegung der Vorhänge bei längerer (1/25 s) Belichtungszeit

Abb. 3 Bewegung der Vorhänge bei kurzerer (1/200 s) Belichtungszeit

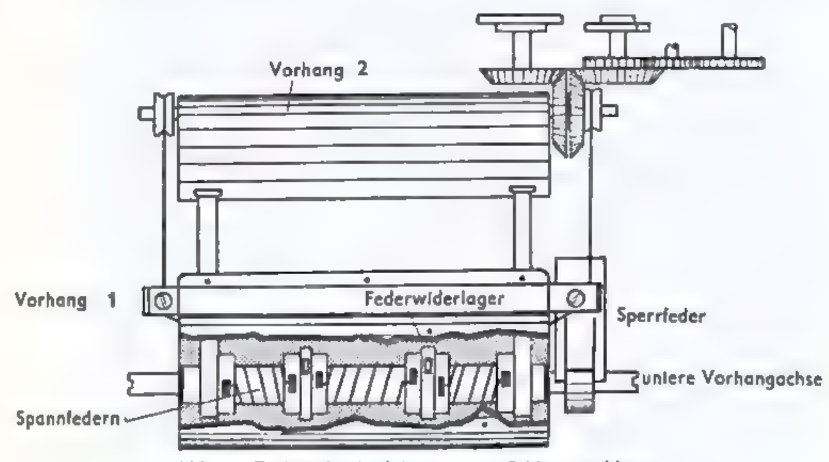


Abb. 4 Technische Ausführung eines Schlitzverschlusses

BELICHTUNGSMESSER

In der Photographie dienen Belichtungsmesser dazu, bei einer vorgewählten Blendenöffnung der Kamera und einer bekannten Filmempfindlichkeit die exakte Belichtungszeit zur Aufnahme eines Objektes zu messen. Neben optischen werden heute vorwiegend elektrische Belichtungsmesser verwendet. Sie setzen das vom Motiv reflektierte Licht über ein Photoelement (vgl. S. 410) in einen schwachen elektrischen Strom um, der durch den Zeigerausschlag gemessen wird. Je nach Helligkeit des Motivs ist der Ausschlag größer oder kleiner. Durch einen kleinen Umrechnungsmechanismus kann die genaue Belichtungszeit des Aufnahmegegenstandes, kombiniert mit Filmempfindlichkeit und Blende, abgelesen werden.

Die beiden wichtigsten Teile eines elektrischen Belichtungsmessers sind das Photoelement und das Meßwerk, denen zur leichteren und genaueren Funktion noch eine Vorrichtung zum Auffangen des Lichtes und eine Ableseeinrichtung beigefügt sind. Das Licht fällt durch eine Wabenlinse und eine Wabenblende auf das Photoelement; Linse und Blende dienen dazu, das einfallende Licht auf den Winkel zu begrenzen, der dem Bildwinkel einer normalen Kamera entspricht. Das Photoelement besteht aus einer Eisenplatte, auf welche eine dünne Schicht des Elementes Selen aufgetragen ist. Diese Selenschicht ist mit einer Platinschicht von 1/100000 mm Stärke bedeckt, die noch lichtdurchlässig ist. Fällt nun das Licht auf die Selenschicht, so werden in ihr Elektronen frei. Diese treten in die Platinschicht und dadurch beginnt über einen dünnen Leitungsdraht zwischen der Platinschicht und der Eisenplatte ein schwacher Strom zu fließen. Der Einfall des Lichts auf die Selenschicht hat also einen Strom zur Folge. Dieser ist der Menge des Lichtes proportional, d.h., bei großer Helligkeit fließt ein starker Strom und umgekehrt. Schaltet man nun in den Stromweg ein kleines Meßwerk ein, so kann die Stärke des Stroms am Zeigerausschlag abgelesen werden. Über eine mit dem Zeigerausschlag des Meßwerkes in Übereinstimmung gebrachte Umrechnungsvorrichtung, an der nur die Filmempfindlichkeit vorher eingestellt wird, können dann die Belichtungszeiten für verschiedene Blendenöffnungen abgelesen werden.

In Abb. 2 ist ein Belichtungsmesser im Schnitt dargestellt. Hier wird durch das Einstellrad eine Walze, die eine Kurve trägt, so gedreht, daß die Kurve durch den Schnittpunkt von Meßwerkzeiger und der Standlinie (gespannter Faden) geht. Durch die Drehung wird über die beiden Kegelräder das flexible Band mit den Belichtungszeiten und Belichtungswerten (Lichtwerten) gegenüber der feststehenden Blendenzahlreihe bewegt. Die Kurvenwalze ist gegenüber ihrem Kegelrad entsprechend der Filmempfindlichkeit (Einstellung durch Einstellrad) verstellbar.

Statt der Selenphotoelemente werden neuerdings auch Photowiderstände benutzt (Abb. 3). Diese wandeln das Licht nicht direkt in elektrische Energie um, sondern ändern unter seinem Einfluß ihre elektrische Leitfähigkeit, d.h. ihren elektrischen Innenwiderstand. Man benötigt also zusätzlich eine Stromquelle, z.B. eine Batterie. Da die Leitfähigkeit des Photowiderstandes mit wachsender Lichtintensität zunimmt, wächst dabei auch der elektrische Strom. Diese Belichtungsmesser können noch sehr schwaches Licht (z.B. Mondlicht) messen.

Für die Anwendung der Belichtungsmesser gibt es zwei Methoden: 1. die (häufigere) Objektmessung, wobei zum Objekt hin gemessen wird. Dabei erfaßt der Belichtungsmesser innerhalb eines begrenzten Raumwinkels das Licht, das vom Aufnahmegegenstand zurückgestrahlt wird; 2. die Lichtmessung, bei der am Ort des Aufnahmegegenstandes das diesen beleuchtende Licht gemessen wird. Da nun das Objekt auch durch das Licht beleuchtet wird, das seine Umgebung auf ihn wirft, setzt man vor die Linsen bzw. Wabenlinsen eine Streuscheibe oder einen gewölbten bzw. halbkugelförmigen Diffusor, um das Licht aus einem größeren Raumwinkel zu erfassen (Abb. 4).

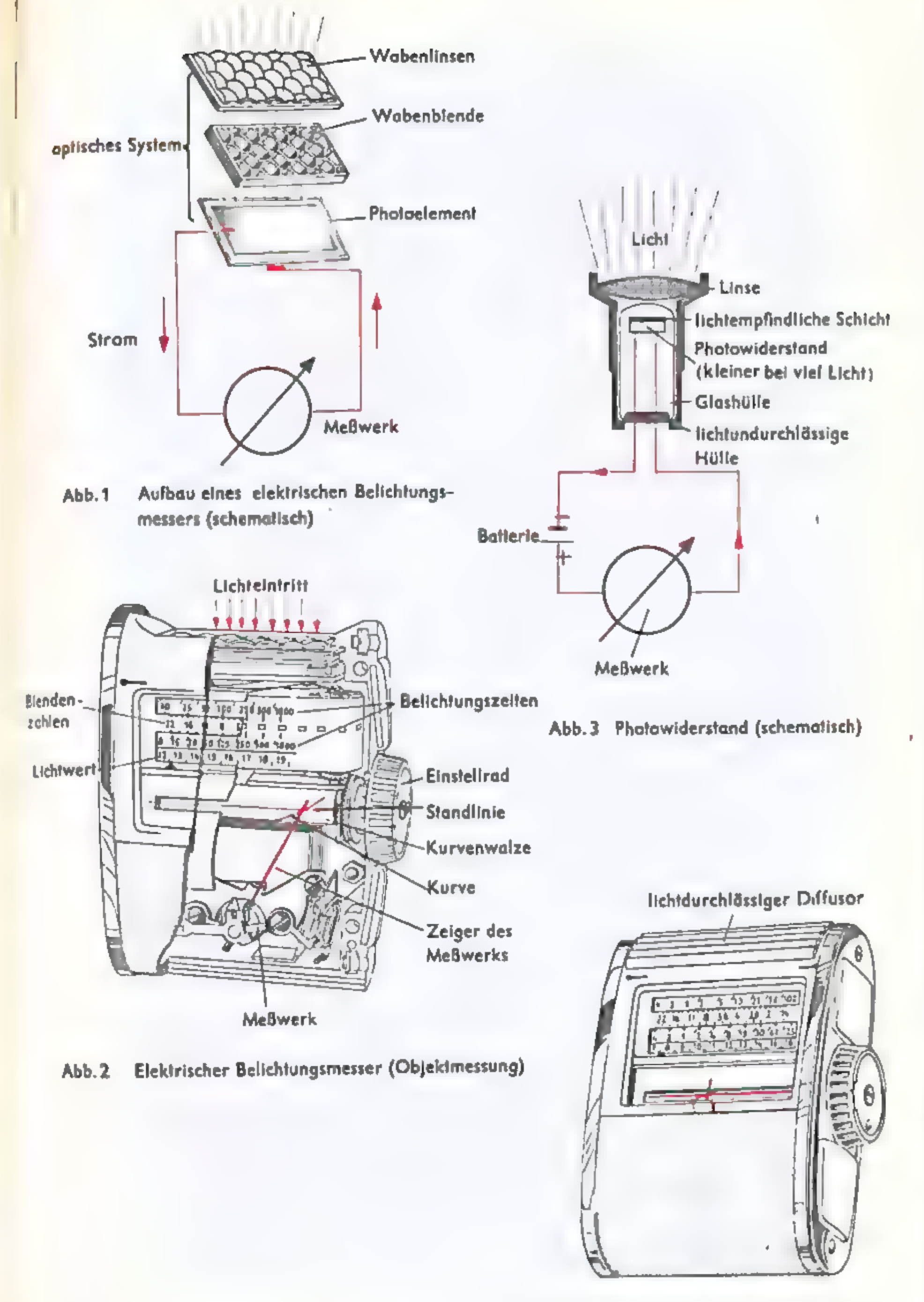


Abb. 1 Aufbau eines elektrischen Belichtungsmessers (schematisch)

Abb. 2 Elektrischer Belichtungsmesser (Objektmessung)

Abb. 3 Photowiderstand (schematisch)

Abb. 4 Elektrischer Belichtungsmesser (Lichtmessung)

ELEKTRONENBLITZGERÄT

Elektronenblitzgerät ist die übliche Bezeichnung (anstelle des korrekteren: Röhrenblitzgerät) für eine photographische Blitzlichtquelle, deren Licht von einer Gasentladungslampe geliefert wird. Der Blitz zündet verzögerungslos (über die X-Synchronisation, bei Schlitzverschlüssen ist die „Offenzeit" einzustellen), die Leuchtzeit t_1 liegt meist bei $^1/_{1000}$ Sek. Den grundsätzlichen Aufbau zeigt Abb. 1. Das Edelgas in einer Röhre wird durch die in der Zündspule erzeugte sekundäre Hochspannung (ca. 10 000 V) über die angelegte Zündelektrode ionisiert, so daß der Blitzkondensator (Ladespannung etwa 500 Volt) sich entladen kann. Die primäre Zündspannung wird am Spannungsteiler abgegriffen und damit der Zündkondensator aufgeladen. Er entlädt sich beim Schließen des Synchronkontaktes und erzeugt in der Zündspule den hochgespannten Zündimpuls. Der Spannungslieferant, der sogenannte Generatorteil, besteht aus der Stromquelle (bei Studiogeräten Bleiakku, bei Amateurgeräten ein wartungsfreier Nickel-Cadmium-Akku oder Trockenbatterien), dem Zerhacker (Wechselrichter) oder Transistor-Gleichspannungswandler, der die Akkuspannung periodisch an die Primärwicklung des Transformators weitergibt, und dem Transformator mit nachgeschaltetem Gleichrichter. Die hochtransformierte Sekundärspannung des Transformators lädt den Blitzkondensator auf.
Um eine gleichmäßige Spannung im Blitzkondensator zu gewährleisten und Verluste durch Leckstrom auszugleichen, schaltet z. B. eine *Steuerautomatik (Stromsparautomatik)* nach erfolgter Aufladung den Strom nicht völlig ab, sondern nur auf ein Minimum zurück. Die Aufladung wird über einen Transistor gesteuert, dessen Basisstrom der Ladestrom des Blitzkondensators ist. Im Gegensatz dazu wird bei der *Regelautomatik (Abschaltautomatik)* der Strom bei Erreichen der Betriebsspannung abgeschaltet; Leckverluste werden durch kurze periodische Nachladeimpulse ausgeglichen. — Wird das Elektronenblitzgerät unmittelbar mit Netzstrom betrieben, so werden die Hochspannungsgleichrichter zwischen Transformator und Kondensator in eine Verdoppleranordnung geschaltet, die den Blitzkondensator mit der Wechselspannung aus dem Netz-Ladestecker auflädt. Oft ist kombinierter Netz- und Akkubetrieb mit besonders kurzen Blitzfolgezeiten möglich *(Servoschaltung)*.
Generatorteil und Blitzgerät sind bei den lichtstärkeren Studiogeräten meist getrennt und nur über Kabel verbunden. Ein zweiter (Zweitleuchte) oder mehrere Lampenstäbe können angeschlossen werden, wobei allerdings die Gesamtlichtmenge des Blitzes konstant bleibt, d. h. bei zwei Leuchten für jede (durch Verkürzung der Leuchtzeit) auf die Hälfte sinkt. Bei Amateurgeräten sind Generatorteil und Blitzgerät meist in eine Baueinheit zusammengefaßt *(Kompaktblitz)*. Die Helligkeit des Elektronenblitzes wird wie bei Blitzlampen nach der Leitzahl berücksichtigt. Das Berechnen von Blende und Entfernung nach der Leitzahl entfällt bei den neueren Elektronenblitzgeräten mit Lichtregelschaltung *(Blitzautomatik, „Computerblitz")*. Hier wird das vom Aufnahmeobjekt reflektierte Licht über eine Photodiode („Sensor", „Zauberauge") gemessen und die Lichtabstrahlung des Geräts bei einer genau vorgegebenen Lichtmenge unterbrochen, indem eine zur Blitzröhre parallelgeschaltete niederohmige Schaltröhre gezündet wird, so daß die Blitzröhre schlagartig erlischt (Abb. 4).
Die Lichtregelschaltung sorgt also innerhalb eines bestimmten Entfernungsbereiches für eine konstante Lichtmenge, indem sie die Leuchtzeit beeinflußt. Diese beträgt bei einer Beleuchtungsentfernung von 0,5 m $^1/_{50000}$ s, bei 5 m $^1/_{1000}$ s, die auf die Filmempfindlichkeit abgestimmte Blende bleibt innerhalb des ganzen Entfernungsbereiches dieselbe. Vereinfacht dargestellt vergleicht eine Transistorschaltung den durch das reflektierte Licht erzeugten Photostrom mit einer Spannungsgröße, die der während des Zündimpulses an der Sekundärwicklung der Zündspule vorhandenen Betriebsspannung analog ist, und zündet die Schaltröhre, wenn die Spannung des Photostroms den vorgegebenen Wert übersteigt.

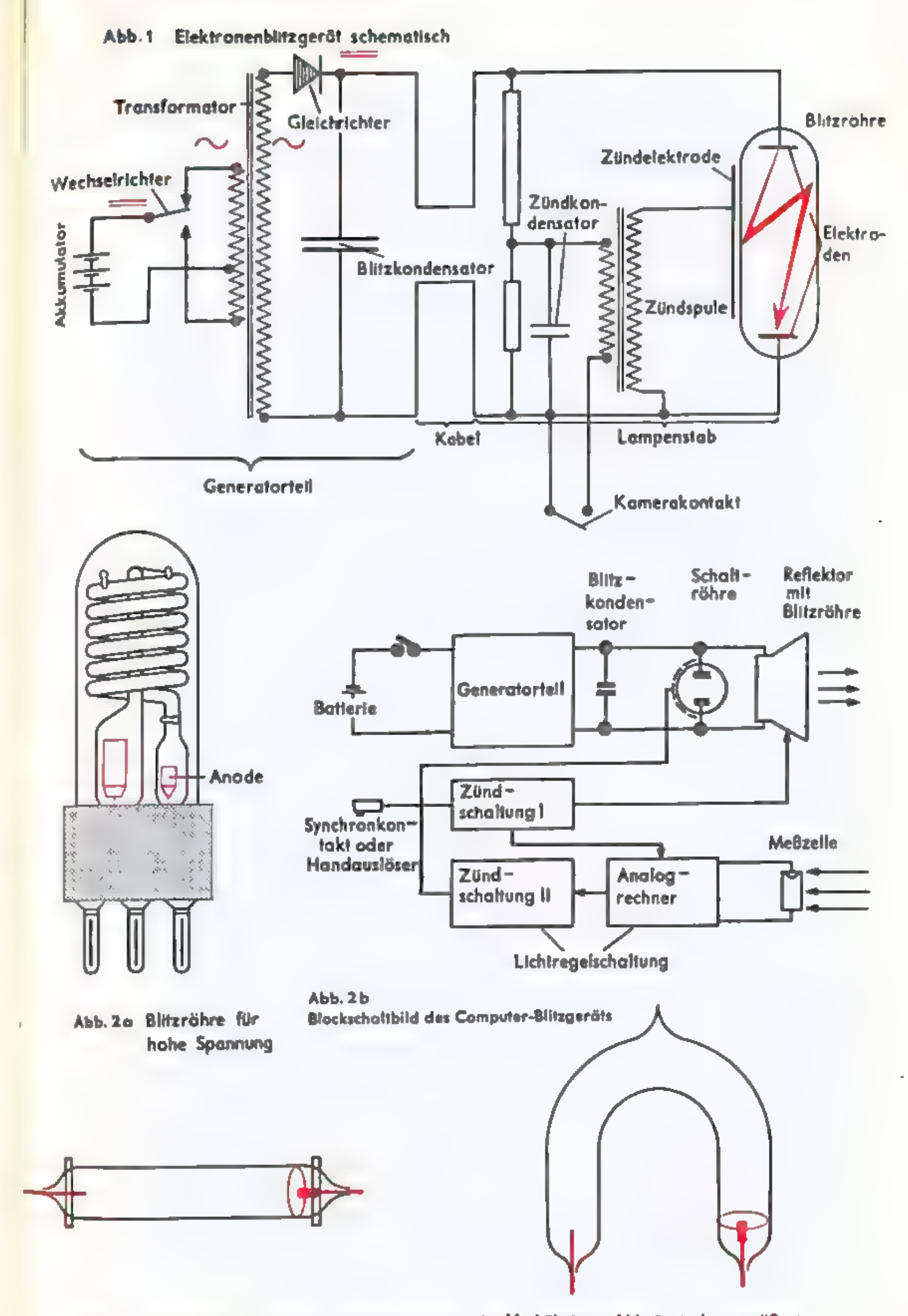


Abb. 1 Elektronenblitzgerät schematisch

Abb. 2a Blitzröhre für hohe Spannung

Abb. 2b Blockschaltbild des Computer-Blitzgeräts

Abb. 3 Blitzröhren moderner Amateurgeräte (im Verhältnis zu Abb. 2 stark vergrößert)

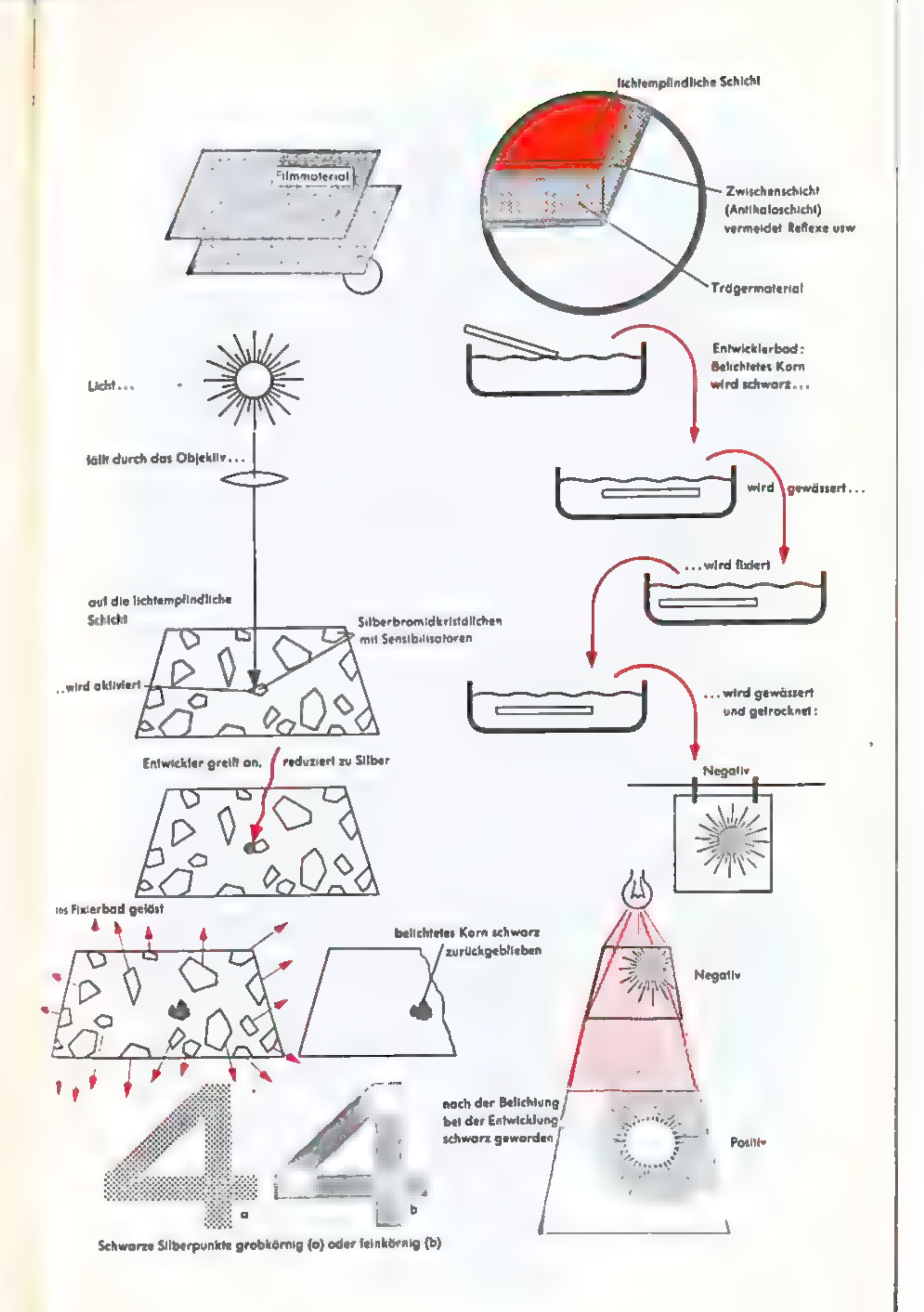
SCHWARZWEISSFILM

Schwarzweiß-Material ist ein sehr lichtempfindliches photographisches Material, das in Filmrollen, Platten oder Papieren in den Handel kommt. Es dient zum Aufnehmen und Wiedergeben von Schwarzweißbildern.

Das Filmmaterial besteht aus einem meist sehr dünnen Träger, für den Nitrocellulose, Acetylcellulose oder Metall verwendet wird. Auf einer meist dunklen, dünnen Farbzwischenschicht (Antihaloschicht) ist die lichtempfindliche Emulsion aufgebracht, eine sehr dünne Schicht aus 40% Silberbromidkriställchen, 50% Gelatine als Bindemittel und 10% Wasser. Bei völliger Dunkelheit wird das Silberbromid emulgiert in Gelatinelösung mit weiteren Zusätzen maschinell auf das Film- oder Plattenmaterial aufgetragen. Die Korngröße der Silberbromidkristalle bestimmt die Lichtempfindlichkeit und das Auflösevermögen. Ein grobes Korn ist sehr stark lichtempfindlich – man kann damit fast im Dunklen Aufnahmen machen –, dafür ist aber das sogenannte optische Auflösevermögen gering. Die lichtempfindliche Schicht wird durch Zusatz geringster Mengen von Gold-, Quecksilber- und anderen Schwermetallionen zum Silberbromid und durch schwache Reaktion mit Sulfidionen chemisch sensibilisiert. Die Original-Silberbromidemulsion ist nicht für alle Farben des Lichtes gleichmäßig empfindlich. Gelbgrüne, gelbe, orange und rote Farbtöne könnte man mit einem solchen Filmmaterial nicht aufnehmen. Durch Zusatz von Farbstoffsensibilisatoren wird die Schicht physikalisch sensibilisiert und damit für einen größeren Farbtonbereich empfindlich gemacht. Orthochromatisches Filmmaterial ist von Blau über Grün bis zu Gelb empfindlich, orthopanchromatisches Material ist über Blau, Grün, Gelb bis zu Orange farbempfindlich, panchromatisches Filmmaterial ist über den ganzen Bereich des farbigen Lichtes bis zum Rot sensibilisiert. Daneben gibt es spezielle Filmmaterialien für wissenschaftliche Untersuchungen mit den verschiedenartigsten Empfindlichkeiten.

Das photographische Bild entsteht dadurch, daß die vom abzubildenden Gegenstand oder Objekt ausgehenden Lichtstrahlen durch das Linsensystem der Aufnahmekamera auf die lichtempfindliche Schicht des Films geleitet werden. Jeder Lichtstrahl stößt dort, wo er auf den Film trifft, auf Silberbromidkriställchen, die dabei aktiviert werden. Trifft beim späteren Entwicklungsprozeß im Entwicklerbad der chemisch wirkende Bildentwickler in Lösung auf ein durch Belichtung aktiviertes Silberbromidkriställchen, dann reduziert der Entwickler das betreffende Silberbromidkörnchen und seine Umgebung zu schwarzem Silbermetall. Unbelichtetes Silberbromid wird nicht reduziert und kann mit dem Fixierbad (einem Komplexlösemittel für unbelichtetes Silberbromid) aus der Filmschicht herausgelöst werden.

Nach dem Auswaschen der Entwickler- und Fixierlösungen aus dem Film und nach der Trocknung liegt das Negativ vor (natürlich kann das Negativ darüber hinaus durch Zwischenbäder, Zwischenbelichtung, Wärmebehandlung usw. noch vielfältig beeinflußt werden). Auf einem Negativ erscheint nun beispielsweise der Schatten weiß und die Sonne schwarz. Belichtet man durch ein solches Negativ hindurch das photographische Positivmaterial oder photographisches Papier, dann fällt durch den dunklen Negativteil kein Licht auf das Photopapier; nur durch die hellen Stellen hindurch kann das Photopapier belichtet werden. Die belichteten Photopapierstellen werden beim Entwicklungsprozeß wieder dunkel, die unbelichteten Stellen bleiben hell. Die hellen Schatten des Negativs werden im Positiv dunkel, so wie es das Auge auch in Wirklichkeit gesehen hat, und entsprechend wird die schwarze Sonne des Negativs im Positiv wieder hell.



Schwarze Silberpunkte grobkörnig (a) oder feinkörnig (b)

PHOTOZELLEN, PHOTOELEMENTE

Der Funktionsweise von Photozellen, die z. B. ein wichtiges Bauelement von Belichtungsmessern bilden, liegen lichtelektrische Effekte zugrunde.

Den Elektronen im Metall kann man Energie mittels einer Strahlung, z. B. durch Licht, zuführen. Man nennt diesen Vorgang Photoeffekt oder lichtelektrischen Effekt. Bei diesem teilt sich die Energie eines Lichtquants dem am lockersten gebundenen Elektron eines Atoms mit (Abb. 1a). Je nachdem, ob diese Energie nun ausreicht, das Elektron zu befreien, aber innerhalb des Metalls zu belassen (Abb. 1b), oder ob sie es darüber hinaus befähigt, das Metall zu verlassen und ins Vakuum auszutreten (Abb. 1c), spricht man vom *inneren* oder vom *äußeren Photoeffekt*. Die Energiebilanz des photoelektrischen Elementaraktes wird durch die „Einsteinsche Gleichung" wiedergegeben:

$$h\nu = A + \tfrac{1}{2}\, m_e\, v^2$$

Hierin bedeuten: $h\nu$ die Energie der Lichtquants, mit der Frequenz ν des Lichtes und dem Planckschen Wirkungsquantum ($h = 6{,}62 \cdot 10^{-27}$ erg s), A die Austrittsarbeit, d. h. jene Energie, die das ausgelöste Elektron benötigt, um den Weg vom Orte der Auslösung durch die Oberfläche hindurch ins Vakuum zurückzulegen, m_e die Masse des Elektrons und v seine Geschwindigkeit im Vakuum. Der äußere Photoeffekt findet seine Anwendung in der *Photozelle* (Abb. 2a). Als lichtempfindliche Photokathode, die sich zumeist in einem evakuierten Glaskolben befindet, kann eine auf einer oxydierten Silberunterlage aufgedampfte, sehr dünne Cäsiumschicht dienen. Zur Vermeidung von Raumladungen und zur Verstärkung durch Ionisation einer Edelgasfüllung wird in den äußeren Stromkreis eine Batterie geschaltet.

Der innere Photoeffekt wird im *Photowiderstand* ausgenützt (Abb. 2b). Bevorzugt wird zur Zeit als Widerstandsmaterial Cadmiumsulfid bzw. Cadmiumselenid mit Widerstandsänderungen von 10^9:1 zwischen Dunkel- und Hellwiderstand.

Findet der innere Photoeffekt im Verarmungsbereich des Positiv-Negativ-Überganges eines Halbleiters (s. S. 312) oder an der Grenzfläche Halbleiter/Metall statt (Abb. 2c), so tritt eine selbständige photoelektrische Spannung auf, die sich äquivalent der Differenz der Spannungsabfälle in Sperr- und Flußrichtung erweist (Halbleiter-Photoelement, Sperrschicht-Photozelle). Die Zellen in Abb. 2a und Abb. 2c entwickeln eine EMK (= *e*lektro*m*otorische *K*raft, d. h. diejenige Kraft, die eine Trennung von negativen und positiven Ladungen bewirkt; Einheit: Volt). Der Photowiderstand (Abb. 2b) benötigt eine Hilfsspannung (Batterie). Photozellen und Photoelemente werden in der optischen Steuerungstechnik, als optische Schranken und in vielen anderen technischen Bereichen als hochempfindliche und präzise Meßvorrichtungen, aber auch als Stromversorgungsvorrichtungen (z. B. von Satelliten) verwendet. In letzterem Falle bevorzugt man Siliziumphotoelemente, die etwa 10% der absorbierten Lichtenergie in elektrische Energie umwandeln.

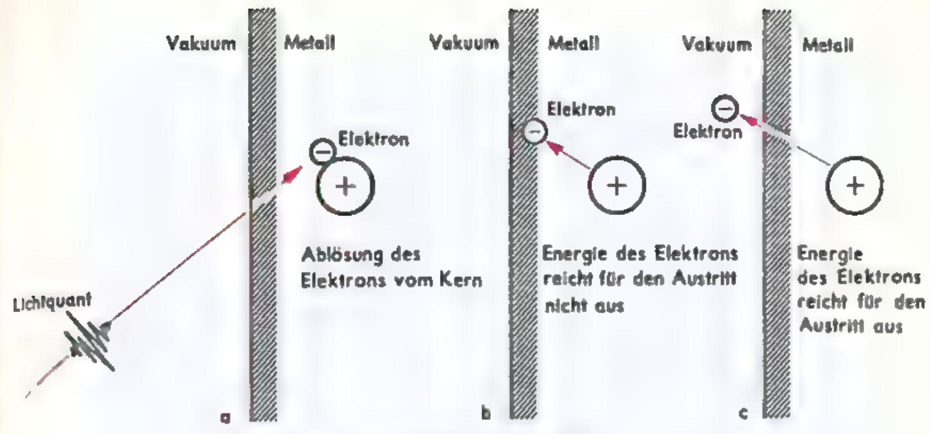


Abb. 1 Photoelektrischer Elementarakt

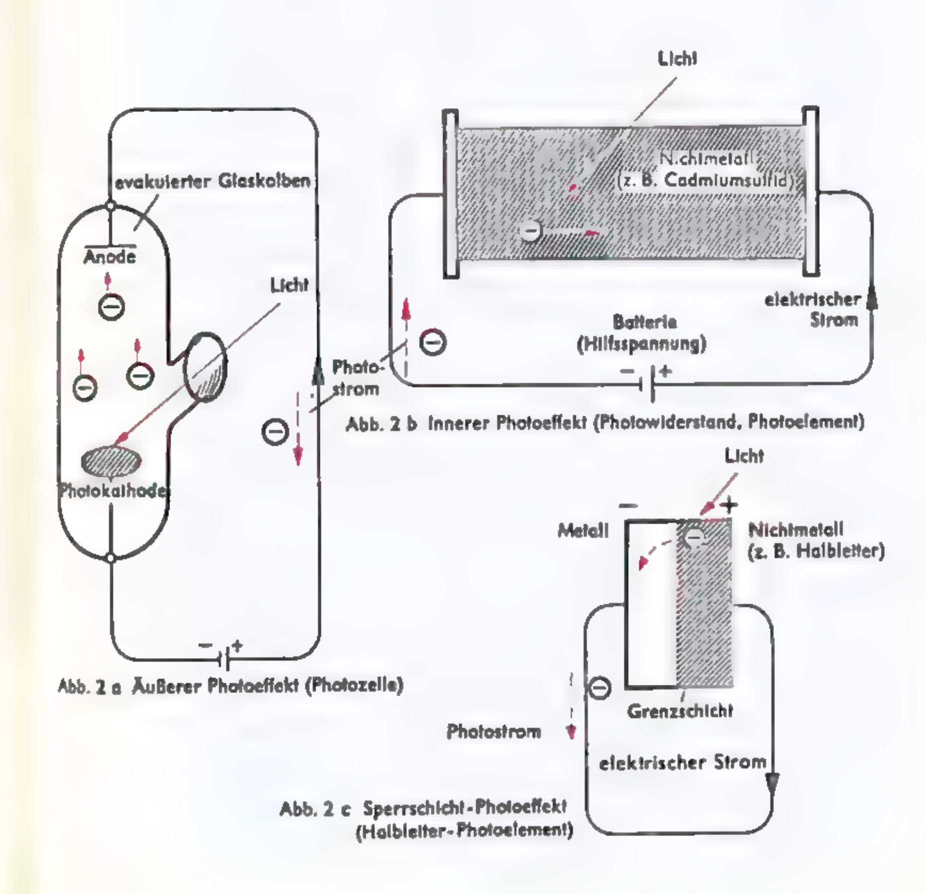


Abb. 2 a Äußerer Photoeffekt (Photozelle)

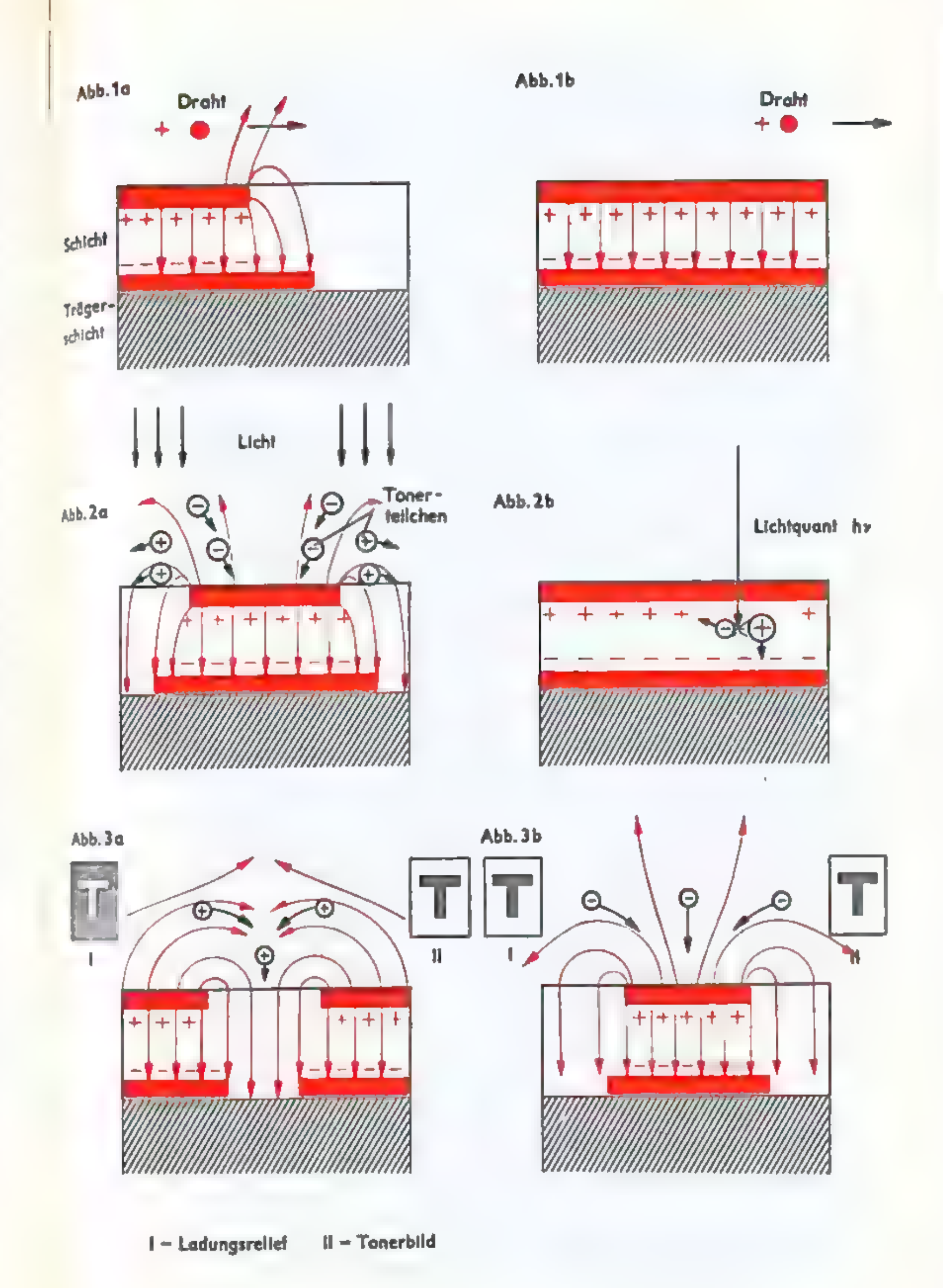
Abb. 2 b Innerer Photoeffekt (Photowiderstand, Photoelement)

Abb. 2 c Sperrschicht-Photoeffekt (Halbleiter-Photoelement)

ELEKTROPHOTOGRAPHIE

Die übliche Photographie beruht auf der Lichtempfindlichkeit von Silberhalogeniden (s. S. 408). Das Bild wird dabei durch chemische Prozesse in flüssiger Phase entwickelt. Im Gegensatz dazu geht die Elektrophotographie von photoelektrischen und elektrostatischen Effekten aus, die Bildentwicklung geschieht auf trockenem Wege. Als lichtempfindlicher Schicht bedient sie sich der Oberfläche eines Photohalbleiters.

Solche Halbleiter weisen einen sehr hohen Dunkelwiderstand auf (bis zu 10^{14} Ohm), während ihr Widerstand bei Belichtung um 5 bis 7 Zehnerpotenzen niedriger ist. Solche Substanzen sind z. B. Selen (Se), Cadmiumsulfid (CdS) oder Zinkoxid (ZnO). Für die Elektrophotographie haben sich insbesondere dünne Selenschichten auf metallischem, geerdetem Träger bewährt. Die Sensibilisierung geschieht durch Aufsprühen positiver Ionen aus einer Koronaentladung auf die Oberfläche. Zu diesem Zweck wird ein Netz parallel ausgespannter, dünner Drähte in geringem Abstand über die Oberfläche geführt. Die Drähte befinden sich auf einem Potential von rund + 8 000 Volt (Abb. 1a). Die Oberfläche der Schicht wird dadurch auf etwa + 600 Volt gegenüber ihrer Rückseite aufgeladen, auf der sich eine entsprechende negative Influenzladung ausbildet (Abb. 1b). Bei Belichtung tritt an den belichteten Stellen infolge der Widerstandserniedrigung eine Entladung, d. h. ein Ausgleich der Ladungen zwischen Oberfläche und Rückseite ein. In Abb. 2a ist angenommen, daß rechts und links Licht auf den Halbleiter fällt, die Mitte aber unbelichtet bleibt (der dadurch entstehende Feldverlauf ist eingezeichnet). Das „Bild" ist damit latent als Ladungsrelief verschiedener elektrostatischer Aufladung entstanden. Seine „Entwicklung" geschieht mittels eines sehr feinkörnigen, elektrisch aufgeladenen Pulvers (z. B. gefärbtes Kunstharz), das Toner genannt wird. Die Bewegung solcher Tonerteilchen (Durchmesser etwa 1/1 000 mm) ist in Abb. 2a eingezeichnet. Man kann je nach der Wahl der Tonerteilchen (d. h. je nach dem Vorzeichen ihrer elektrischen Aufladung) ein Negativ oder ein Positiv des unsichtbaren Ladungsreliefs sichtbar machen. Das Ladungsrelief läßt sich auch auf elektrischem Wege praktisch beliebig oft auf andere isolierende Flächen (z. B. Papier) übertragen und dort entwickeln. Die Fixierung erfolgt durch Erwärmung, welche die Kunstharzkörner zum Schmelzen bringt, so daß sie nicht mehr der elektrostatischen Kräfte bedürfen, um an der Papierfläche zu haften (s. Vervielfältigung S. 704). Die elektrische Leitfähigkeit wird durch Photoionisation infolge eines Photoeffektes hervorgerufen (Abb. 2b): Ein Lichtquant $h\nu$ (vgl. S. 410) spaltet ein Elektron von einem Atom ab und erzeugt dadurch ein Ladungsträgerpaar. Das negative Elektron neutralisiert eine positive Elementarladung an der Oberfläche, der positiv geladene Atomkern bewegt sich zur Rückseite und neutralisiert dort eine negative Ladung. In den Abb. 3a und 3b ist noch einmal an einem Beispiel das Zustandekommen eines sichtbaren Bildes im Negativ-Positiv-Prozeß (Abb. 3a) und im Positiv-Positiv-Prozeß (Abb. 3b) dargestellt.



RÖNTGENAPPARATE

Röntgenapparate im weiteren Sinne sind alle Apparaturen, mit denen in der Medizin durch Röntgenstrahlen Untersuchungen zur Diagnosestellung oder Strahlenbehandlung, in der Technik Werkstoffprüfungen ausgeführt werden. Je nach Verwendungszweck werden besondere Apparate und Röhrentypen verwendet. In der Röntgentherapie zielen die verschiedenen Gerätetypen und Röhrenanordnungen vor allem auf die Applikation größtmöglicher Strahlenquantitäten auf den Krankheitsherd unter weitgehender Schonung des umgebenden Gewebes.

Röntgenstrahlen sind kurzwellige elektromagnetische Schwingungen, die feste Körper zu durchdringen vermögen (Ausnahmen). Sie entstehen, wenn in einem luftleeren Raum Elektronen freigemacht, stark beschleunigt und dann abgebremst werden; dies geschieht in der Röntgenröhre. Zur Freimachung der Elektronen wird der aus Wolfram bestehende Heizfaden der Kathode durch elektrischen Strom zur Weißglut gebracht; bei etwa 2 000°C treten die Elektronen aus. Ihre Beschleunigung erfolgt durch eine zwischen Anode (+) und Kathode (—) angelegte hohe Spannnung (etwa 10 000 bis mehrere 100 000 Volt). Die Abbremsung der Elektronen erfolgt bei ihrem Aufprall auf die Anode (Brennfleck). Die Anode ist heute in den meisten Röhren als tellerförmige Drehanode (Abb. 3) ausgebildet; dadurch wird in jedem Augenblick ein anderer Teil der Anode als Brennfleck belastet. Die Röntgenröhre selbst (Glaskolben mit Anode und Kathode) ist von einer Röhrenschutzhaube umhüllt; eine Ölfüllung dient der Ableitung der beim Betrieb enstehenden Wärme. Die zum Betrieb einer Röntgenröhre benötigte Hochspannung liefert der Hochspannungstransformator, der die Drehstromspannung des Netzes auf die in der medizinischen Diagnostik notwendige Spannung hinauftransformiert.

Damit alle Stromstöße des Wechselstroms in gleicher Richtung durch die Röntgenröhre gehen, sind dieser Ventilröhren vorgeschaltet. Man unterscheidet Vier- und Sechsventilapparate; letztere sind leistungsfähiger (Abb. 4). In den modernsten Apparaten sind die Ventile durch Sperrschichtgleichrichter ersetzt.

Am besten sind Knochen und mit Kontrastmitteln gefüllte Hohlorgane auf den Röntgenaufnahmen darstellbar. Für die Aufnahme von Knochen wird im allgemeinen der Buckytisch verwendet (Anordnung der Röntgenröhre mit Tiefenblende und Lichtvisier an einem Stativ über einem Tisch mit verschiebbarer Streustrahlenblende), zur Darstellung des Magen-Darm-Kanals sowie für Herz- und Lungendurchleuchtungen das Durchleuchtungsgerät (Abb. 1). Für Aufnahmen von kleineren Körperteilen wie Finger, Hand und Zehen verwendet man die Röntgenkugel, bei der Röntgenröhre und Transformator im gleichen Behälter vereinigt sind. Vom Schaltpult aus kann wahlweise der Buckytisch für Knochenaufnahmen oder das Durchleuchtungsgerät bedient werden.

In der Röntgentherapie wird besonders bei der Behandlung von Krebsgeschwülsten mit viel höheren Spannungen gearbeitet als in der Diagnostik. Auch hier liegt der Patient auf einem Lagerungstisch oder sitzt vor der Therapieröhre. Diese arbeitet entweder feststehend oder wird nach einem bestimmten Plan bewegt, so daß der aus der Röhre austretende Röntgenstrahl den Krankheitsherd trifft, aber bei seinem Durchtritt durch die Haut und die oberen Gewebsabschnitte des Patienten fortlaufend kreisend einen anderen Punkt berührt. Die Bezeichnung „Schichtaufnahmen" rührt daher, daß man bei diesem Verfahren Krankheitsherde in bestimmten Körpertiefen genau auf einer Röntgenaufnahme beurteilen will. Man kann mit Schichtaufnahmen (nach verschiedenen Methoden) beispielsweise Zerfallshöhlen in der Lunge bei tuberkulösen Erkrankungen genau feststellen und lokalisieren.

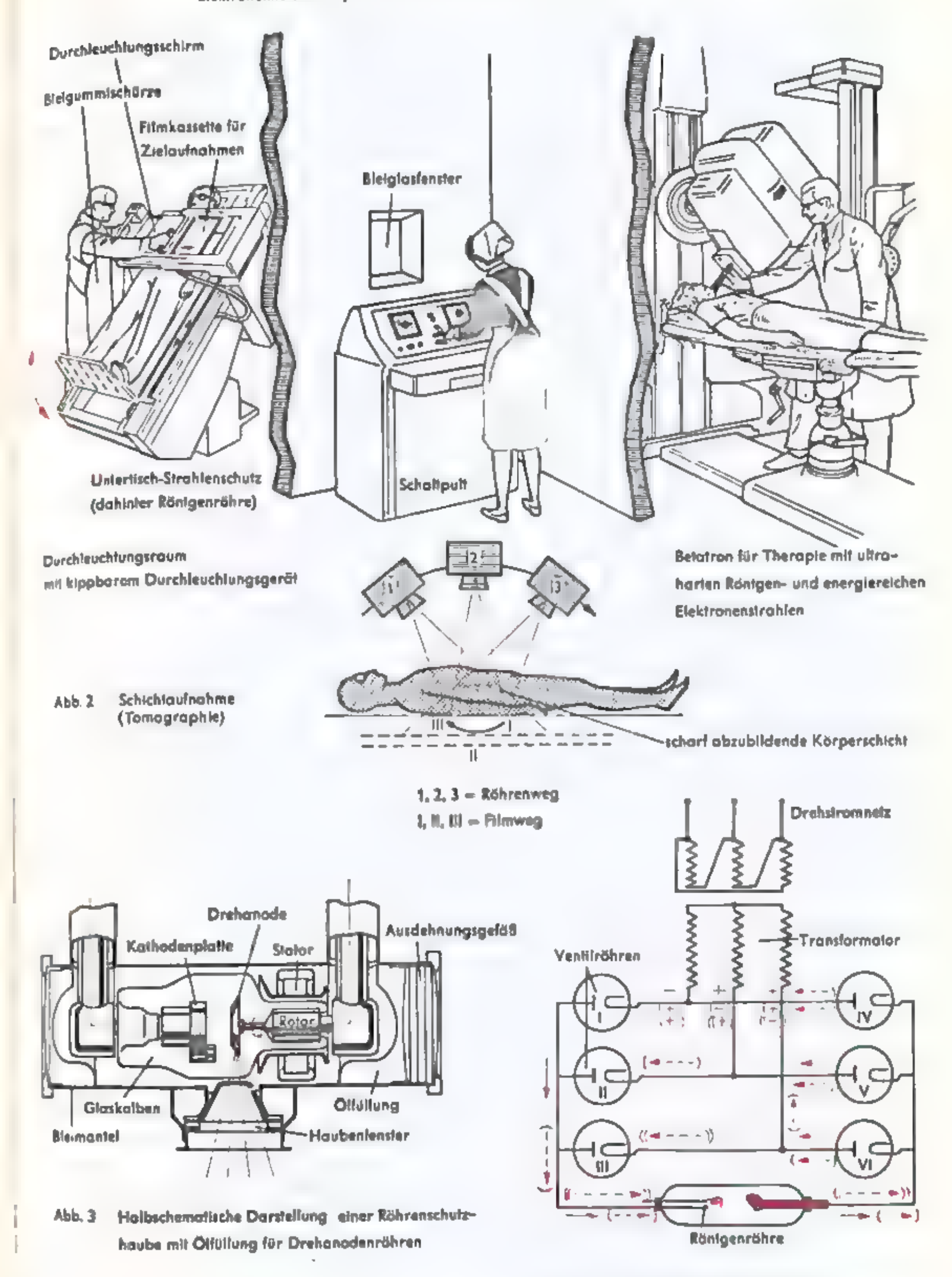


Abb. 1 Diagnostischer Röntgenarbeitsplatz (Teilansicht) mit Raum für Elektronentiefentherapie

Abb. 2 Schichtaufnahme (Tomographie)

Abb. 3 Halbschematische Darstellung einer Röhrenschutzhaube mit Ölfüllung für Drehanodenröhren

Abb. 4 Schaltung eines Sechsventilapparates

ELEKTROKARDIOGRAPHIE

Jeder Muskel kann nur eine Bewegung ausführen, nämlich die Verkürzung seiner Fasern durch Kontraktion. Dies gilt auch für den Herzmuskel. Bei jeder Aktion eines Muskels treten elektrische Ströme auf, die sich im Verlaufe der Bewegung (beim Herzmuskel im Verlaufe der Kontraktion) ändern und durch die verschiedenen Gewebe des Körpers hindurch an die Körperoberfläche gelangen. Dort können sie von Elektroden abgenommen und mit Hilfe eines Registrierapparates, des Elektrokardiographen, aufgezeichnet werden. Die Aufzeichnung in Form einer Kurve heißt Elektrokardiogramm (EKG). Das ursprüngliche Verfahren benutzte das im Jahre 1903 von dem niederländischen Physiologen Willem Einthoven entwickelte Saitengalvanometer (Abb. 1). Eine versilberte Quarzsaite wird durch ein Magnetfeld geführt; sie erhält elektrische Impulse von den an der Körperoberfläche durch Elektroden abgenommenen Aktionsströmen. Je nach der Stromrichtung wird die Saite in Abhängigkeit von der Stromstärke abgelenkt. Diese Bewegung wird mit Hilfe eines optischen Systems auf ein mit konstanter Geschwindigkeit abrollendes Papierband projiziert, das mit einem lichtempfindlichen Belag beschichtet ist. Ist das Gerät stromlos, ergibt sich eine gerade Linie. Der Erregungsablauf im Herzmuskel führt jedoch zu einer Potentialdifferenz, weil der nicht erregte Teil elektropositiv und der erregte elektronegativ ist. Die Aktionsströme zeichnen als Resultierende eine typische Kurve, die von der Lage des Herzens (der elektrischen Herzachse) und von der Leitung innerhalb des Herzmuskels bestimmt wird. Krankhafte Veränderungen, die diese beiden Faktoren betreffen, geben sich demnach im Kurvenverlauf zu erkennen.

Für den praktischen Gebrauch ist das Saitengalvanometer heute verschwunden. Man verwendet jetzt den mit Verstärkerröhren arbeitenden Verstärker-Elektrokardiograph (Abb. 2). Die vom Körper abgeleiteten Aktionsströme treten bei E_1 und E_2 in den Röhrenverstärker, wo sie mehrere tausendmal verstärkt und auf ein Spiegelgalvanometer geleitet werden. Entsprechend den Ablenkungen des Spiegelsystems wird ein Lichtstrahl am Spiegel reflektiert, auf einem lichtempfindlichen Film entsteht die entsprechende Aufzeichnung.

Die Ableitungen von der Körperoberfläche werden an schon durch Einthoven vorgeschlagenen Standardpunkten vorgenommen (Abb. 3); Ableitung 1: linker Arm und rechter Arm; Ableitung 2: linkes Bein und rechter Arm; Ableitung 3: linkes Bein und linker Arm. Dazu kommen heute weitere Ableitungen von den Gliedmaßen und von der Brustwand. Moderne Geräte zeichnen diese Kurven nicht mehr nacheinander, sondern synchron auf. Das normale Elektrodiagramm hat die in Abb. 4 gezeigte Form: Der Kurventeil von P bis Q entspricht der Kontraktion der Vorhöfe, von Q bis T der Kontraktion der Kammern des Herzens.

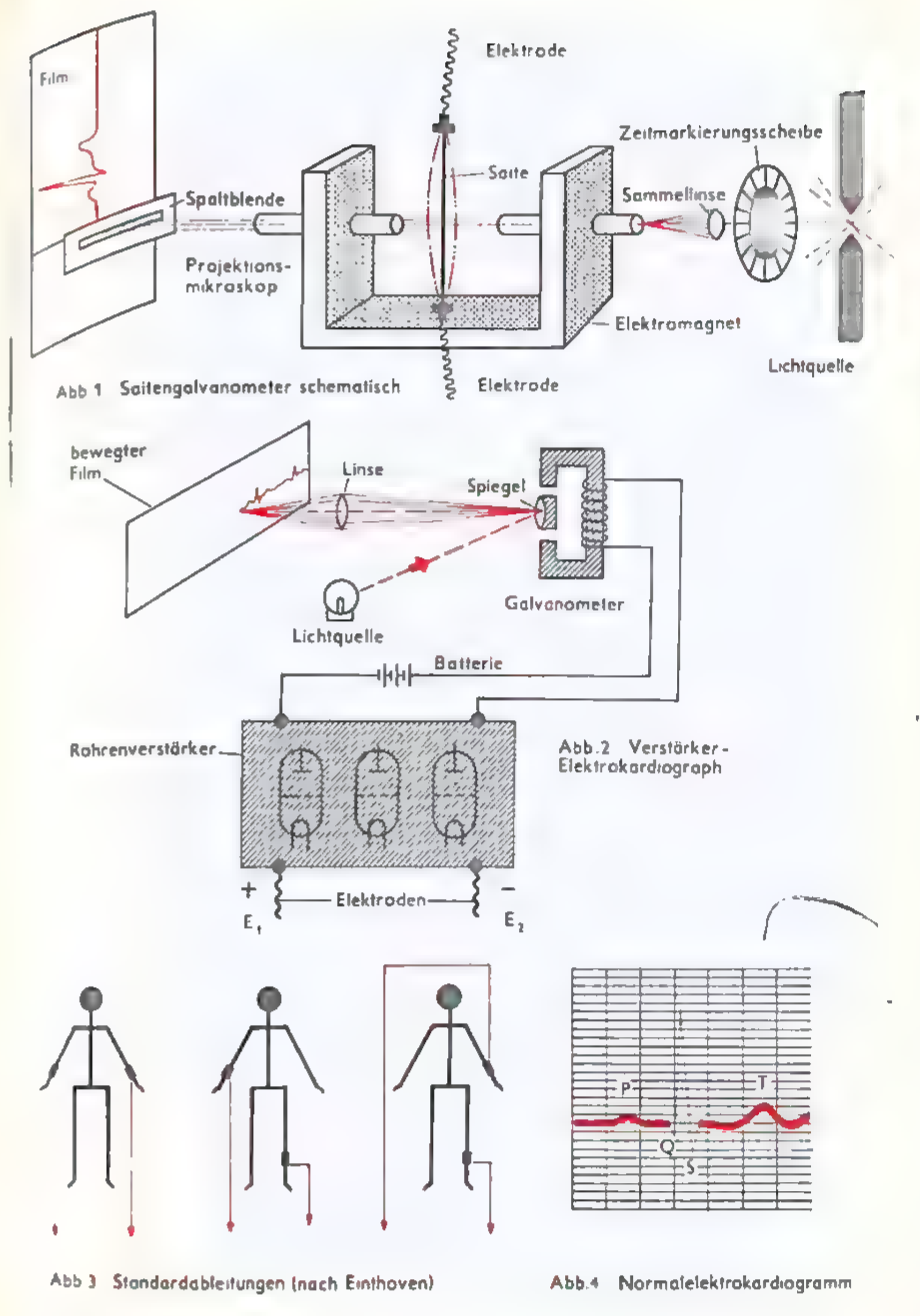


Abb 1 Saitengalvanometer schematisch

Abb. 2 Verstärker-Elektrokardiograph

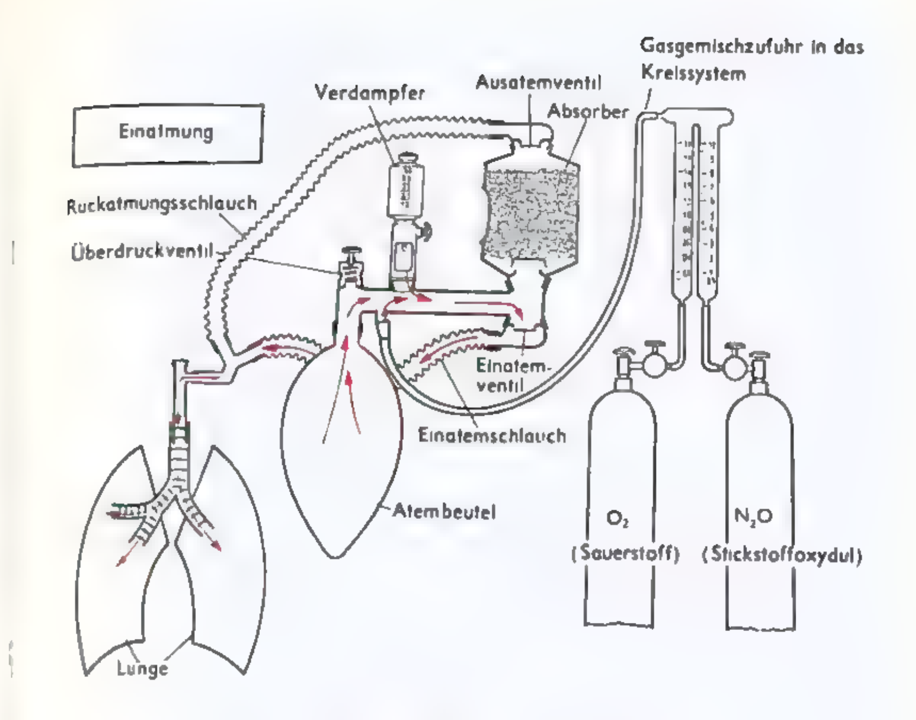
Abb 3 Standardableitungen (nach Einthoven)

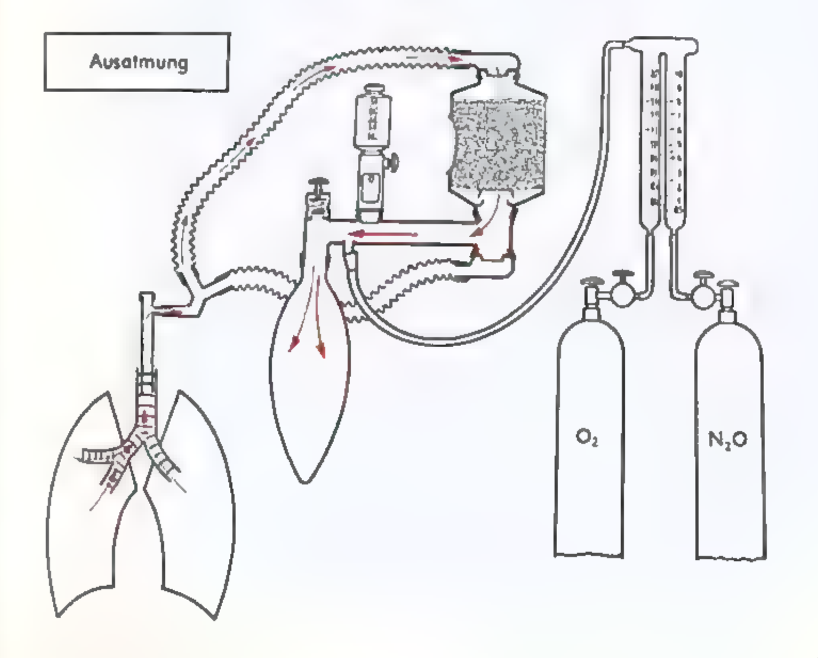
Abb. 4 Normalelektrokardiogramm

NARKOSEGERÄTE

Als Narkosegeräte bezeichnet man die bei der Inhalationsnarkose verwendeten Apparaturen zur nach Menge und Zusammensetzung regelbaren Verabreichung von Narkosegasgemischen in Verbindung mit Frischluft bzw. reinem Sauerstoff. Den Einsatz leicht flüchtiger flüssiger Narkosemittel ermöglichen als einfachste Narkosegeräte die *Tropfmasken,* mit Gaze bespannte Drahtgestelle, die Mund und Nase des Patienten bedecken. Die Dämpfe der auf die Gaze aufgetropften Narkoseflüssigkeit werden eingeatmet; die Regulierung des Dampf-Atemluft-Gemisches erfolgt durch Änderung der Tropfgeschwindigkeit. Genauere Dosierung von Narkosedämpfen ist durch *Verdunstungsapparate* möglich, aus denen die Dämpfe der eingefüllten Narkoseflüssigkeit durch einen regelbaren Anteil der darübergeleiteten Einatmungsluft mitgerissen werden. Bei Raumtemperatur gasförmige Substanzen und der zur Atmung benötigte Sauerstoff werden aus Stahlflaschen, in denen sie verflüssigt bzw. unter hohem Druck enthalten sind, über fein regulierende Ventile entnommen. Die in der Zeiteinheit entströmende Gasmenge wird mit Dosimetern gemessen.

Die Narkosegeräte werden in unterschiedliche Systeme eingeteilt: Beim *offenen System* erfolgt die Einatmung über einen Verdunster; unter Zwischenschaltung eines zur künstlichen Beatmung benötigten Atembalges wird das Frischluft-Narkosedampf-Gemisch über die Atemmaske dem Patienten zugeleitet. Die ausgeatmete Luft strömt durch das Auslaßventil der Atemmaske ins Freie. Gasförmige Narkotika werden unter Beimengung von Dämpfen flüchtiger Narkoseflüssigkeiten im Verdunster dem Patienten über *Rückatemapparate* zugeleitet. In diesen bleibt das Narkosegasgemisch bei der Ausatmung ganz (geschlossene Systeme) oder teilweise (halboffene Systeme) eingeschlossen. Das Gasgemisch wird in die Atemmaske geleitet und gelangt von dort über den zur chemischen Bindung des Kohlendioxids der Ausatmungsluft zwischengeschalteten Adsorber in einen Reservoirbeutel, mit dem auch künstlich beatmet werden kann. Bei Anwendung der Rückatemapparate als geschlossener Systeme wird das ausgeatmete Kohlendioxid vollständig im Adsorber gebunden. Sauerstoff und Narkosegemisch werden nach Maßgabe des Verbrauches nachgeliefert. Beim halbgeschlossenen System wird das Kohlendioxid nur teilweise adsorbiert, die restlichen Anteile werden durch den Frischgasstrom weggeblasen. In beiden Fällen atmet der Patient direkt aus dem Reservoirbeutel ein und über den Adsorber aus (Kreisatemsystem), oder Ein- und Ausatmung erfolgen über den Adsorber (Pendelatemsystem). Andere Narkosegeräte liefern das Gasgemisch in größerem Strom zum Reservoirbeutel. Ein Teil der Ausatmungsluft wird auch hier, allerdings ohne Zwischenschaltung eines Adsorbers, zurückgeatmet. Die Menge des Rückatmungsgases hängt vom Frischgaszustrom ab. Der Vorteil dieser Narkosegeräte liegt bei der Atmungserleichterung für den Patienten.

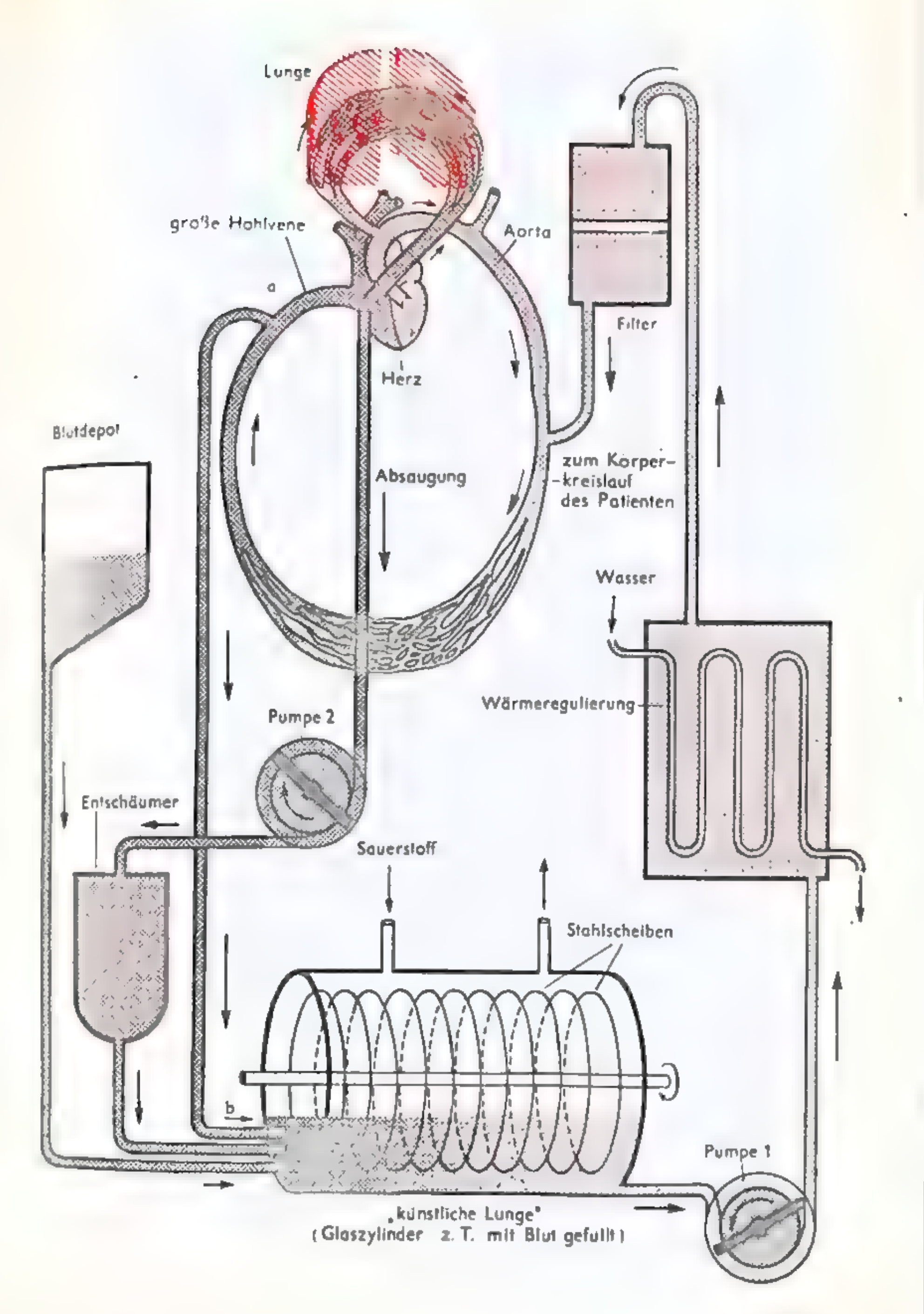




HERZ-LUNGEN-MASCHINE

Die Chirurgie des Herzens verlangt zumeist eine Eröffnung des Herzmuskels, so daß unter Sicht des Auges operiert werden kann. Für kurzdauernde Eingriffe hat man die Möglichkeit, unter Hypothermie (Unterkühlung) die Blutzirkulation ganz aufzuheben. Größere Eingriffe verlangen die Aufrechterhaltung des Kreislaufs mit Hilfe einer Herz-Lungen-Maschine. Die verschiedenen Systeme haben zum einen die Aufgabe, das Ersatzblut durch ein Pumpenwerk in Zirkulation zu halten, zum anderen müssen sie das aus dem Körper kommende sauerstoffarme Blut wieder mit Sauerstoff anreichern. Nachstehend wird ein System beschrieben, das u. a. an der Chirurgischen Universitätsklinik Heidelberg verwendet wird.

Das venöse Blut wird, unmittelbar bevor es in das rechte Herz einfließt, aus der großen Hohlvene abgezweigt und in Kunststoffschläuche geleitet (a). Dieses sauerstoffarme Blut wird nunmehr einer künstlichen Lunge zugeführt (b). In einem liegenden Glaszylinder, der zum Teil mit Blut gefüllt ist, rotiert eine Anzahl von Stahlscheiben, die sich dabei mit Blut benetzen. Dieses nunmehr zu einem dünnen Film mit großer Oberfläche angeordnete Blut wird im oberen Teil des Glaszylinders einem Sauerstoffstrom ausgesetzt. Durch Ausgleich der Gasspannung durch die Wände der roten Blutkörperchen hindurch findet nun, genau wie in der menschlichen Lunge, die Aufnahme von Sauerstoff statt. Die Pumpe 1 leitet das nun sauerstoffgesättigte Blut über einen Wärmeregler und einen Filter in den arteriellen Kreislauf des Patienten. Dem Ausgleich der bei der Operation auftretenden Blutverluste dient ein Blutdepot, aus dem Blut nachfließt, wenn ein gewisser Schwellenwert unterschritten wird. Eine zweite Pumpe saugt das Blut aus dem Herzen ab, das auf anderen Wegen als über die große Hohlvene in die Herzkammern gelangt. Dieses Blut wird entschäumt und gleichfalls dem Glaszylinder zugeführt. Alle Teile der Apparatur, die vor Inbetriebnahme mit 3–4 Liter ungerinnbar gemachtem Blut gefüllt wird, sind (bis auf die Stahlscheiben) innen durch Silikonisieren unbenetzbar gemacht.



HÖRGERÄTE

Der Mensch orientiert sich innerhalb seiner Umwelt mit Hilfe der Sinnesorgane. Dem Gehör fällt dabei die Aufgabe zu, Schall, d. h. Sprache, Musik oder Geräusche, aufzunehmen. Akustische Signale können vom Menschen hinsichtlich Lautstärke, Frequenzinhalt, zeitlichem Ablauf und Entstehungsort beurteilt werden. Voraussetzung dafür ist, daß mit beiden Ohren – stereophon – gehört wird und beide Ohren funktionsfähig sind (Abb. 1). Wenn das Funktionieren des Gehörs an einer oder mehreren Stellen der Übertragungskette Ohrmuschel – Gehörgang – Trommelfell – Gehörknöchelchen – ovales Fenster – Schnecke (Cortisches Organ) – Nervenleitung – Hörzentrum beeinträchtigt wird, tritt eine Hörstörung ein. Diese kann durch Verletzung, Erkrankung oder als natürliche Folge des Alterns (Altersschwerhörigkeit) entstehen. Die Medizin ist heute in der Lage, durch medikamentöse Behandlung oder chirurgische Eingriffe einige Hörstörungen zu beheben. Wenn dies nicht möglich ist, kommt die elektrische Hörhilfe, das Hörgerät, zur Anwendung. Hörgeräte sind elektro-akustische Schallverstärker. Ihre wesentliche Aufgabe besteht darin, die Umgangssprache, welche infolge einer Hörstörung von der betreffenden Person nicht oder nur unzureichend verstanden wird, auf ein höheres Schallpegelniveau anzuheben. Dazu wird die aufgenommene akustische Energie durch das Mikrophon des Gerätes in elektrische umgewandelt, diese im Verstärker vergrößert und dem Hörer zugeführt (Abb. 2).

Der Verstärker besteht aus einer Vielzahl verschiedener Bauelemente mit unterschiedlichen Eigenschaften, die schaltungstechnisch in mehreren Stufen zusammengefaßt sind. Die aktiven, verstärkenden Elemente innerhalb der Verstärkerstufen sind Transistoren, deren Halbleitereigenschaften durch die vorhergehende Stufe gesteuert werden und so den gewünschten Verstärkungseffekt bewirken. Die zur Verstärkung notwendige Energie wird einer Batterie oder einem (wiederaufladbaren) Akkumulator entnommen. Die moderne Entwicklung geht dahin, mehrere Verstärkerstufen zu einem einzigen Bauelement (integrierter Halbleiter-Schaltkreis) zusammenzufassen.

Die Geräte sind zur besseren Anpassung an den Hörschaden mit einer Reihe von Einstellmöglichkeiten versehen. Ein Funktionsschalter ermöglicht die Inbetriebnahme bzw. das Ausschalten des Gerätes, ohne daß die Batterie entnommen werden muß. Mit dem Verstärkungsregler kann die gewünschte Verstärkung (angenehmste Lautstärke) entsprechend den akustischen Gegebenheiten eingestellt werden. Mit einer Klangblende, die mehrstufig oder auch kontinuierlich regelbar sein kann, ist die Klangcharakteristik des Gerätes leicht zu verändern. Wenn die Schwerhörigkeit mit einem Lautheitsausgleich (Recruitment) einhergeht, ist oft eine Begrenzung der Ausgangsleistung des Gerätes durch einen kontinuierlich einstellbaren Begrenzungsregler angezeigt. Gegentaktendstufen kommen in erster Linie bei Taschenhörgeräten zur Anwendung; es gibt sie aber auch schon in Hinter-Ohr-Hörgeräten. Man erreicht dadurch eine hohe, verzerrungsfreie Ausgangsleistung bei relativ niedrigem Batteriestromverbrauch.

Man unterscheidet zwei Gruppen von Hörgeräten: die Taschengeräte und die Kopfgeräte. Taschenhörgeräte werden in der Oberbekleidung am Körper getragen (Abb. 3). Der Hörer ist über eine flexible Leitung mit dem Verstärker des Gerätes verbunden und wird durch einen federnden Ring in einem Maßohrstück gehalten, das nach einem individuellen Abdruck des Ohres hergestellt wurde und das Ohr abdichtet. Dadurch wird die akustische Rückkopplung (Pfeifen) vermieden. Kopfgeräte werden hinter dem Ohr (Hinter-Ohr-Hörgeräte), in den Bügeln einer Brille (Hörbrille) oder in der Ohrmuschel und dem äußeren Gehörgang (Im-Ohr-Hörgerät) (Abb. 4) getragen. Bei den Kopfgeräten sind alle Bauelemente des Gerätes – im Gegensatz zu den Taschengeräten auch der Hörer – in einem Gehäuse untergebracht.

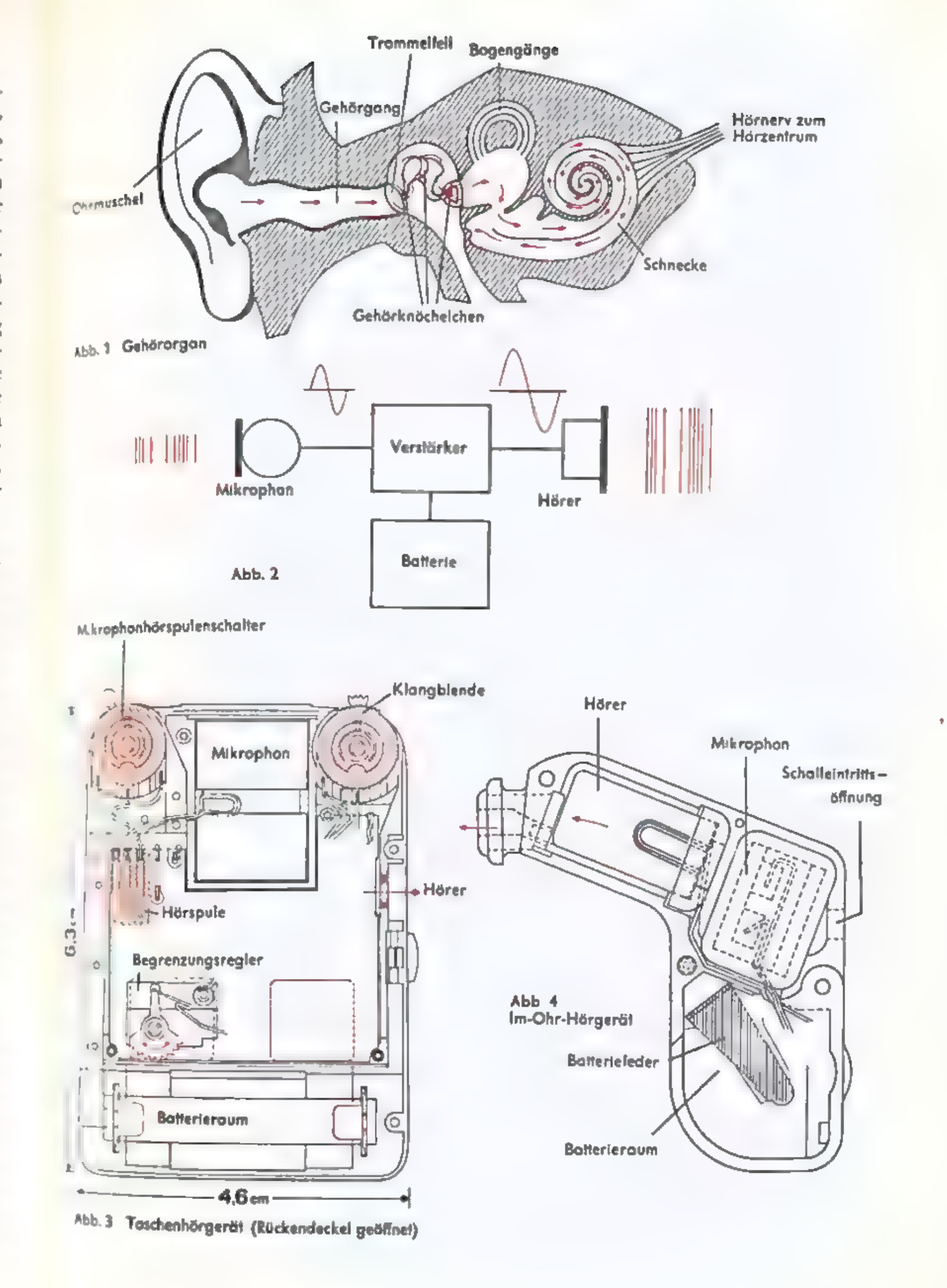


Abb. 1 Gehörorgan

Abb. 2

Abb. 3 Taschenhörgerät (Rückendeckel geöffnet)

Abb 4 Im-Ohr-Hörgerät

PROTHESEN I

Die stets steigende Anzahl von Unfällen und die bedauernswerten Mißbildungen, die in letzter Zeit in gehäufter Zahl auftreten, stellen den Chirurgen und insbesondere den Orthopäden täglich vor das Problem, ausgefallene Gliedmaßen durch künstliche zu ersetzen.

Die wohl einfachste Methode des Ersatzes bietet ein Stück Holz, das vorn einen Haken enthält (Abb. 1), um so wenigstens das Festhalten bestimmter Gegenstände zu ermöglichen.

Andere Prothesen gehen mehr von ästhetischen Gesichtspunkten aus und versuchen, das künstliche Glied wenigstens äußerlich dem natürlichen nachzubilden. So hat bereits der Römer Silus, der Urgroßvater des Catilina, sich für seine verlorengegangene Hand eine eiserne, nachbildende Prothese anfertigen lassen (Abb. 2).

Bereits im Mittelalter begann man, beide Gesichtspunkte – ästhetische und funktionelle – miteinander zu verbinden.

Am bekanntesten wurde die eiserne Hand des Götz von Berlichingen (Abb. 3), die nicht nur äußerlich einer Hand nachgebildet ist: ihr Handgelenk, Daumen und alle Fingerglieder waren einzeln beweglich und konnten in jeder Stellung arretiert werden. Drei Druckknöpfe sorgten dafür, daß das Handgelenk, der Daumen und die Fingergelenke in Streckstellung springen konnten.

Aber alle diese Vorrichtungen blieben so lange Stückwerk, als man nicht erkannte, welche Mechanismen den Muskelbewegungen des Menschen zugrunde lagen. Erst als Physiologie und Kybernetik tiefe Einblicke in die Vorgänge bei der Bewegung verschafften, konnten grundsätzlich neue Wege beschritten werden.

Betrachten wir die Vorgänge, die sich im Körper z. B. beim Bewegen eines Gewichts abspielen (Abb. 4, S. 427): Von einem höheren Zentrum, z. B. dem Gehirn (1), kommt über absteigende (efferente) Fasern (2) der Befehl an das untergeordnete Zentrum (4) des Rückenmarks (3), den Muskel des Armes zur Bewegung des Gewichtes in Tätigkeit zu bringen. Dies geschieht dadurch, daß das Rückenmark über motorische Nervenfasern (5) an den Muskel (6) den Befehl ausstößt, sich zu verkürzen.

Hierbei entspricht das Gehirn dem Direktor eines Werkes, der eine Anweisung gibt, das Rückenmark einem dem Direktor unterstellten Meister, der die nun auszuführenden Arbeiten überwacht. Es muß also beim Meister eine Kopie der Arbeitspläne (im medizinischen Sprachgebrauch: eine Efferenzkopie) vorliegen; dazu muß der Meister über den Fortschritt des von ihm gegebenen Befehls unterrichtet werden. Dies geschieht dadurch, daß in dem Muskel und in den Sehnen Meßwerke (7 und 9) eingebaut sind, die die bestehende Situation überprüfen (messen) und über aufsteigende (afferente) Fasern (8 und 10) dem Rückenmark die augenblickliche Situation mitteilen. Stimmt diese Situation mit der beim Rückenmark gespeicherten Efferenzkopie überein, so wird das Rückenmark über die aufsteigenden Fasern (11) dem Gehirn die richtige Durchführung des Befehles mitteilen. Im anderen Fall wird über die Leitung (11) dem Gehirn mitgeteilt werden, daß z. B. ein Überschuß oder ein Mangel an Arbeitsleistung aufgetreten ist – das Gehirn kann nun korrigierend eingreifen. Den ganzen beschriebenen Vorgang nennt die Medizin das Reafferenzprinzip.

Die vom Gehirn über die Nerven zum Muskel kommenden Befehle kann man nun durch Auflegung von Elektroden auf die betreffenden Nerven messen und aufzeichnen (ähnlich wie ein Elektrokardiograph, vgl. auch S. 416; Abb. 5). Es ist zu beachten, daß es nicht einmal zu einer Bewegungsfolge kommen muß. Es können – z. B. bei Fehlen der Hand – vom Gehirn Befehle ausgestoßen werden, die vom Rückenmark weitergegeben werden, ohne daß ein Erfolgsorgan vorliegt. Und umgekehrt besteht die Möglichkeit, daß das Gehirn durch Reizung dieser Nerven Meldungen erhält, die von „Bewegungen" berichten, die gar nicht vorgenommen werden. Viele, die im Krieg eine Hand – entsprechendes gilt natürlich auch für die unteren

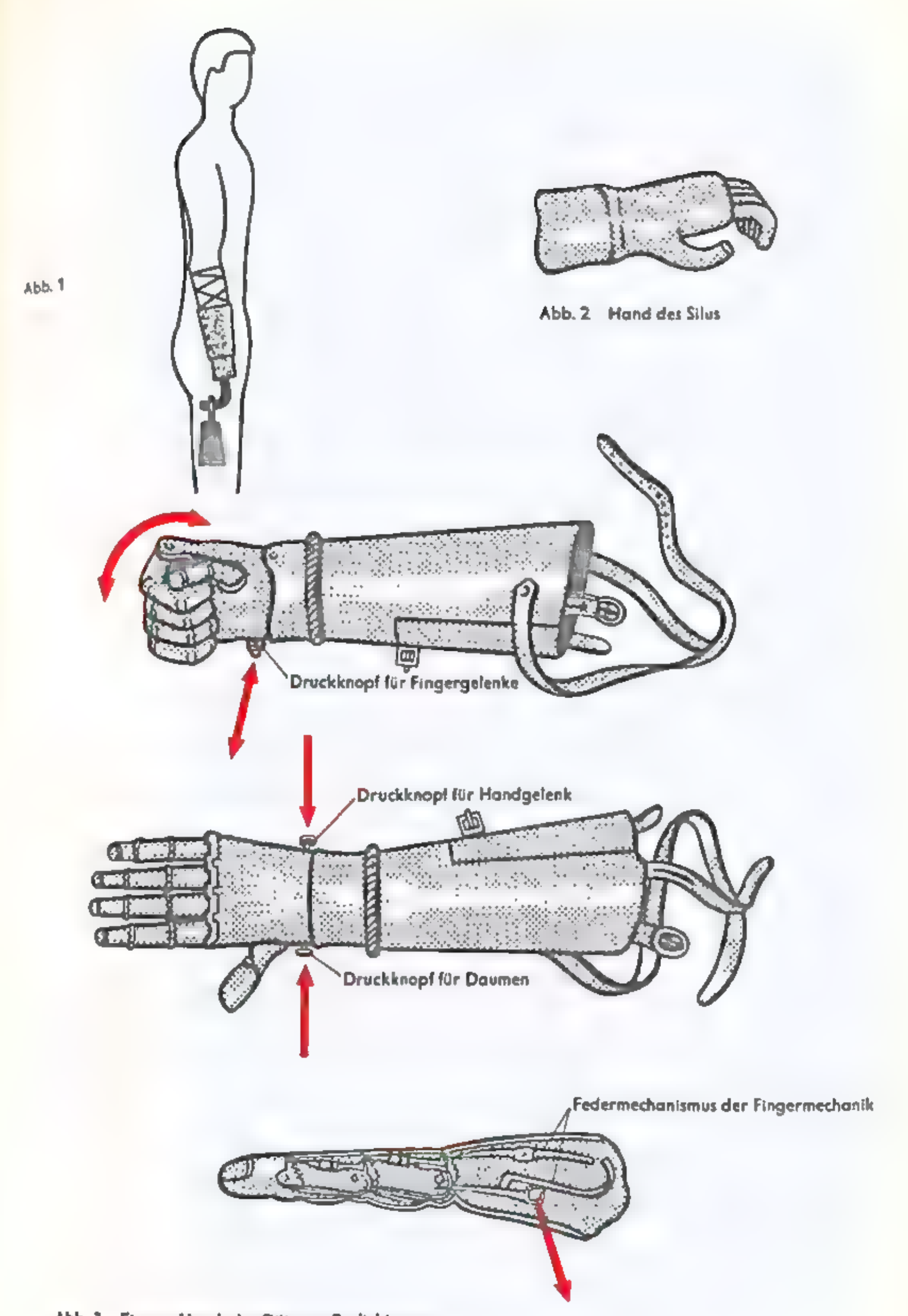


Abb. 1

Abb. 2 Hand des Silus

Abb. 3 Eiserne Hand des Götz von Berlichingen

PROTHESEN II

Extremitäten – verloren haben, können davon berichten, daß sie trotz Verlustes z. B. der rechten Hand dort Schmerzen spüren, obwohl sie gar nicht mehr vorhanden ist (Phantomgefühl).
Wenn es also gelänge, vom Zentralnervensystem kommende Kommandos unmittelbar abzufangen, diese zu übersetzen und einer Maschine mitzuteilen, müßte es auch möglich sein, eine Maschine zu schaffen, die – vorausgesetzt sie könnte diese Befehle deuten – ohne weiteres in der Lage wäre, diese Befehle durchzuführen.
Diesen Weg hat man auch beschritten. Man hat solche zum Muskel kommenden Signale in der Weise ausgenutzt, daß Invalide, deren Hand amputiert war, lernten, mit einer Maschine, einer Prothese umzugehen, indem sie die gewohnheitsmäßige Umgangsfertigkeit mit der Hand zur Steuerung der Prothese ausnutzten (Abb. 6): Der vom Gehirn (1) über die Nervenfasern (2) kommende Befehl wird mit Hilfe von Elektroden (3) abgefangen und über die Leitungen (4) Verstärkern (5) zugeführt. Von diesen führt eine Leitung zu einem Rechensystem (6), das entsprechend der Stärke und der Anordnung des ursprünglichen Befehls des Gehirns elektrischen Drosselspulen (7 und 8) „Anweisungen" erteilt. Entsprechend dem eingegebenen Programm setzen diese hydraulische Systeme in Betrieb (9 und 10), die die künstliche Hand bewegen.
Da jede Bewegung immer von einer Gegenbewegung (Muskelstrecker und Muskelbeuger) begleitet ist, stehen jeweils zwei Systeme miteinander in Konkurrenz (9 und 10). Das eine System (9) bewirkt bei Inbetriebsetzen die Beugung, das andere System (10) bewirkt bei Inbetriebsetzen die Streckung. Hierbei bedarf es nur für ein System eines Antriebsmotors, der Antrieb des anderen kann passiv, z. B. durch Federzug, geschehen Eingebaute Sicherungen (11) sorgen für die richtige Reihenfolge der Betätigung.
Eine künstliche Prothese muß hauptsächlich folgende Anordnungen enthalten:
1. Einen Stromabnehmer (3), der die in den Muskel geleiteten Potentiale abfängt,
2. einen Verstärker (5), der diese Potentiale übersetzt und umformt, daß sie zur Steuerung der Prothese dienen können,
3. ein System (6), das diese umgeformten Potentiale in die richtige Reihenfolge zur Ausführung des gegebenen Befehls bringt (sie programmiert),
4. das eigentliche Motorwerk (7, 8, 9, 10), das die Befehle in Bewegung überträgt.
Darüber hinaus können in eine solche Prothese noch spezielle Fühler, die die mechanischen Wirkungen der Umwelt messen und registrieren, eingebaut werden, ähnlich der in den Muskel- und Sehnenspindeln und den in der Haut eingebauten Tastkörperchen. Diese dienen als Meßwerke, die mit Energiewandlern (Pulsgeber) ausgestattet sind und nunmehr wieder mit dem die Bewegung überwachenden Ausführungsorgan oder dem Gehirn in Verbindung treten können. Auf diese Weise ist die genaue Durchführung des gegebenen Befehls garantiert. Hilfsmittel hierbei sind z. B. Magnetvibratoren, die an unbeschädigten Teilen der Haut der verbliebenen Extremität befestigt sind.
Die moderne medizinische Technik hat Prothesen geschaffen, die die Bewegungsfunktionen verlorener Gliedmaßen (Hände und Füße) in erstaunlich vollendeter Weise nachzuahmen verstehen. Invaliden lernen mühelos, zweckgerichtete Bewegungen mit der Prothese auszuführen und bereits früher erworbene Fähigkeiten auszunutzen und zu verbessern.

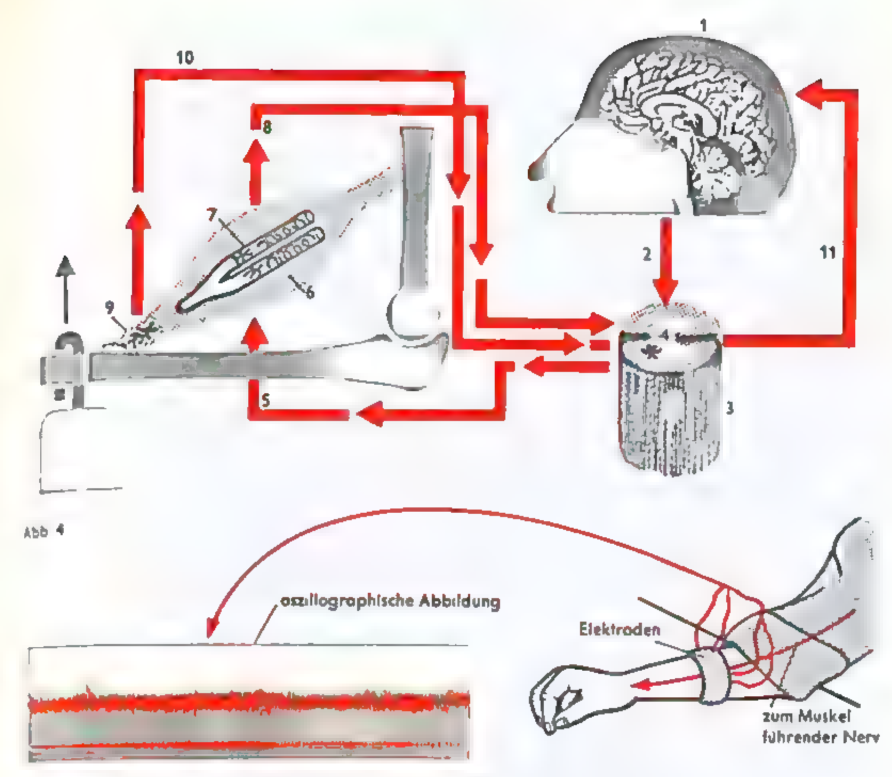


Abb. 5 Abnahme von Nervenaktionsströmen mit einer oszillographischen Abbildung

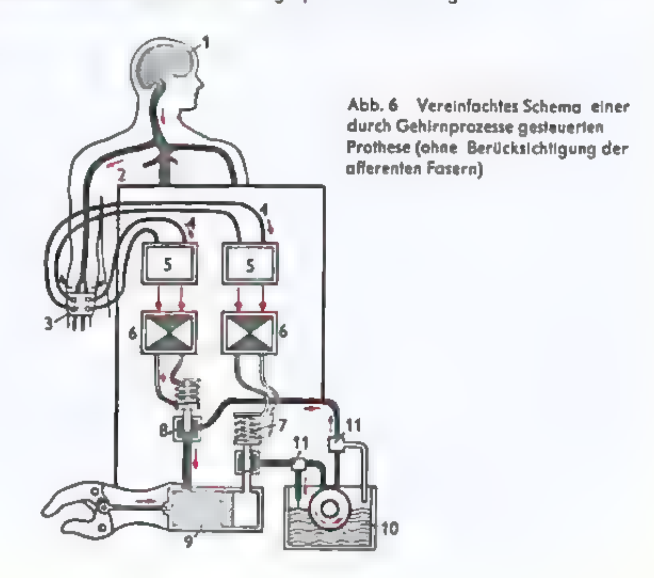


Abb. 6 Vereinfachtes Schema einer durch Gehirnprozesse gesteuerten Prothese (ohne Berücksichtigung der afferenten Fasern)

KÜNSTLICHES HERZ I

Das Herz als „Motor" des Kreislaufs besteht aus zwei Kammern und zwei Vorhöfen. Der Weg des Blutes ist folgender: Das sauerstoffarme, mit Kohlensäure angereicherte Blut (venöses Blut) wird von den unteren Körperpartien (14) durch die untere Hohl- oder Sammelblutader (10) und von den oberen Körperpartien (9) durch die obere Sammelblutader (11) dem rechten Vorhof (3) zugeführt. Von dort gelangt es durch das Ventilsystem der rechten Segelklappen (16) in die rechte Herzkammer (1). Diese pumpt das Blut durch die wiederum als Ventil wirkende rechte Taschenklappe (17) über die Lungen*schlag*adern (5) in die Lungen (6).
Wir nennen – unabhängig davon, ob die Gefäße sauerstoffarmes oder sauerstoffgesättigtes Blut enthalten – alle vom Herzen wegführenden Gefäße Schlagadern oder Arterien, alle zum Herzen hinführende Blutadern oder Venen.
In der Lunge wird das sauerstoffarme Blut (venöses Blut) mit Sauerstoff angereichert (arterialisiert) und fließt durch die Lungen*blut*adern (7) zum linken Vorhof (4). Von dort gelangt es durch die linken Segelklappen (15) in die linke Herzkammer (2) und wird von dort durch die linken Taschenklappen (18) über die Hauptschlagader (Aorta; 12 und 13) in den Körper gepumpt (Abb. 1).
Den Blutweg rechte Kammer–Lunge–linker Vorhof nennen wir „kleinen" oder „Lungenkreislauf"; mit „großem" oder „Körperkreislauf" wird der Weg linke Kammer–Körper–rechter Vorhof bezeichnet.
Da hierbei der eine (rechte) Teil des Herzens hauptsächlich der Blutzuführung in die Lunge, der andere (linke) Teil der Versorgung der übrigen Körperabschnitte dient, unterscheiden wir nach ihrer Funktion ein „rechtes" Herz (versorgt die Lunge) und ein „linkes" Herz (versorgt den Körper; Abb. 2).
Wichtig ist, daß das Herz nach dem Füllungsgrad der Herzkammern, bei dem die Vorhöfe eine nicht unwichtige Rolle spielen, einen größeren oder kleineren Auswurf (je nach Bedarf des Körpers auf die Minutenmenge bezogen: Herzminutenvolum) zeigt: Bei Arbeit größeren, bei Ruhe geringeren Auswurf. Darüber hinaus kann das Herz die ausgeworfene Blutmenge auch noch durch langsameres und schnelleres Schlagen bewältigen. Das rechte Herz, das nur einen relativ kleinen Kreislauf zu versorgen hat, hat eine kleinere Muskelmasse (ist also dünnwandiger) als das linke Herz, das ja den ganzen übrigen Körper versorgen muß.
Beide Herzen müssen in ihrer Arbeitsweise fein aufeinander abgestimmt sein, sowohl zeitlich als auch mengenmäßig. Dies trifft nicht immer zu; so führen manche Krankheiten (Klappenfehler oder Entzündungen) zu einem Versagen (Insuffizienz) z. B. des rechten Herzens. Dies kann die von dem starken linken Herzen in den Körper gepumpte Blutmenge nicht mehr bewältigen, es treten Blutstauungen besonders in den unteren Körperpartien auf. Umgekehrt führt ein Versagen des linken Herzens zu Stauungen des Blutes in den Lungen mit all ihren so verheerenden Folgen.
Welche Möglichkeiten bieten sich an, die Arbeit einzelner Herzabschnitte oder gar des ganzen Herzens zu ersetzen?
Nehmen wir als einfaches Beispiel den Fall an, daß eine der beiden Segelklappen des Herzens schwer beschädigt sei und zu Ausfallserscheinungen geführt habe.
Handelt es sich dabei um eine Verengung (Stenose), so kann der Chirurg durch einen relativ kleinen Eingriff diese mit der Hand sprengen und damit wieder einigermaßen normale Verhältnisse schaffen. Für den Fall, daß sich die Klappe nicht ganz schließt, kann die zu große Öffnung durch teilweises Zunähen beseitigt werden. In all den Fällen aber, in denen die Klappen z. B. durch eine Krankheit zerstört wurden, kann nur Abhilfe geschaffen werden, indem man eine künstliche Herzklappe einsetzt (Abb. 3, S. 431). Man verwendet ein Kugelventil:
In einem kleinen Metallkäfig befindet sich ein Kunststoffbällchen, das ähnlich wie ein Ping-Pong-Ball im Ventil des Schnorchels der Sporttaucher wirkt. Ein Wulst aus

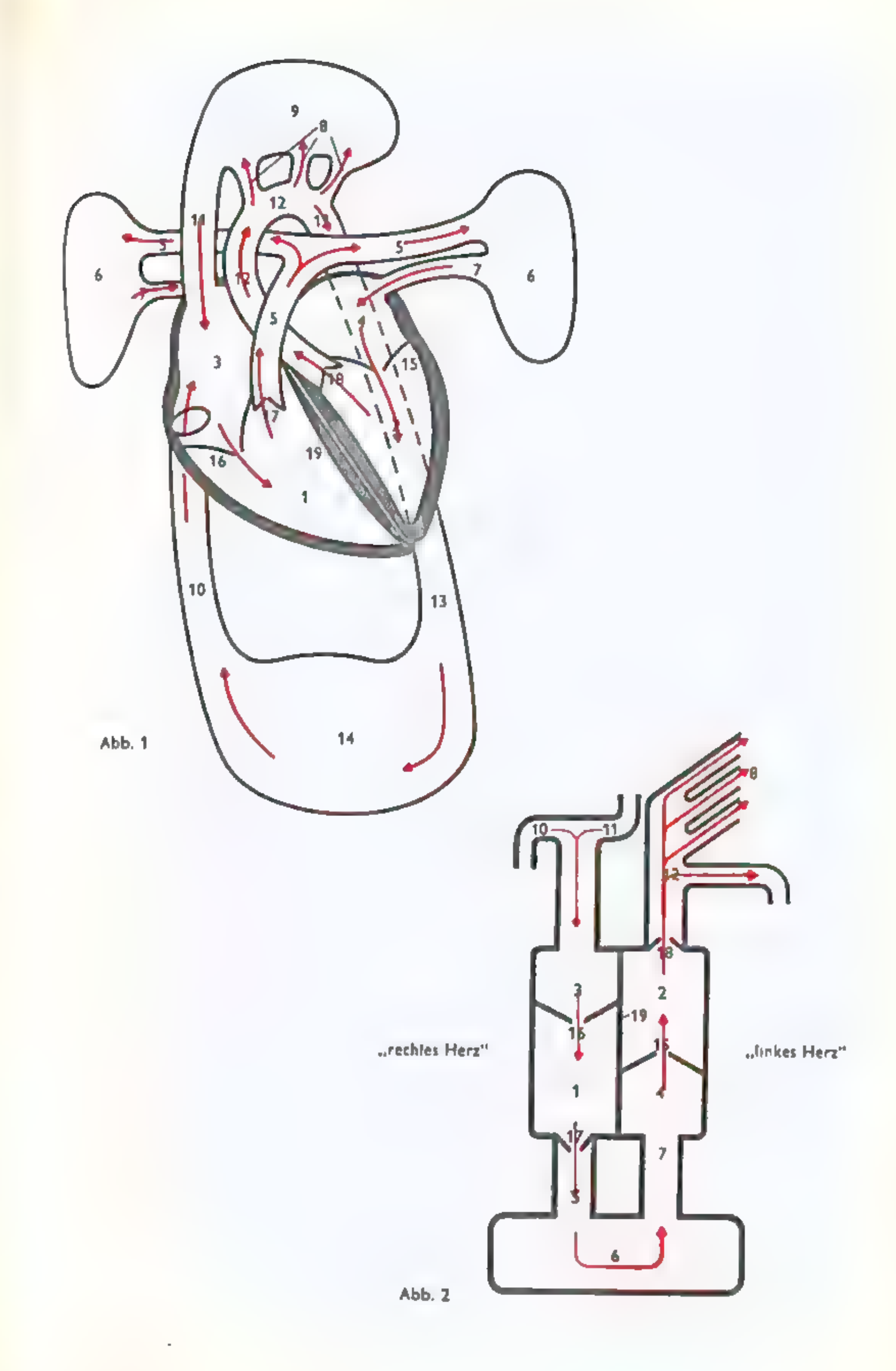


Abb. 1
Abb. 2

KÜNSTLICHES HERZ II

Kunststoff (Teflonring) dient zum Einnähen der Klappenprothese in den Ring der Segelklappe (Abb. 3b) oder Metallringe erleichtern deren Einsatz in das Blutgefäß (z. B. beim Ersatz von Taschenklappen, Abb. 3a).

Abb. 4 zeigt die Situation, wie sie sich beim Ersatz der linken Segelklappe darstellen würde: Das Blut, von der Lunge über die Lungenvene kommend, hat den linken Vorhof gefüllt (Abb. 4a). In dem Augenblick, in dem das Herz erschlafft (wir betrachten nur das linke Herz, linkes und rechtes Herz schlagen synchron), übt (in unserem Beispiel) die linke Herzkammer einen Sog aus. Der Ball im Käfig wird von diesem angezogen und gibt dem Blutstrom den Weg frei, so daß dieser die Kammer mit Blut füllen kann. Gleichzeitig schließt sich unter dem Druck der Blutsäule über der Hauptschlagader die linke Taschenklappe. Diesen Vorgang bezeichnet man als Diastole. In der auf die Diastole folgenden Phase der Herztätigkeit (Abb. 4b) zieht sich das Herz zusammen, um das Blut in den Körper zu pumpen. Wir sprechen von der Systole. Hierdurch wird in unserem Beispiel einerseits der „Ball" nach dem linken Vorhof getrieben und verhindert so ein Zurückfließen des Blutes in die Lunge, andererseits werden die Taschenklappen der Hauptschlagader gesprengt und geben den Weg nach dem Körper frei.

Um am Herzen operieren, dieses austauschen oder gar durch ein künstliches Herz ersetzen zu können, muß man für die Zeitdauer dieser Operation dafür sorgen, daß der Kreislauf aufrecht erhalten wird. Der beste Weg hierbei ist es, das ganze Herz durch eine Maschine zu ersetzen. Da aber gleichzeitig damit auch die Lungenfunktion ausfällt, muß auch diese ersetzt werden. Der Organismus – insbesondere das Gehirn – ist sehr empfindlich gegen Sauerstoffmangel; hält dieser länger als 10 Minuten an, stirbt entweder der Organismus oder es bleiben irreparable Schäden zurück. Zu diesem Zweck bedient man sich bei ausgedehnteren Operationen am Herzen der Herz-Lungen-Maschine (Abb. 4c; vgl. S. 420 f.).

Auch angesichts des Problems, das ganze oder das halbe Herz zu ersetzen, stellt sich die Frage nach den Anforderungen, die an ein solches künstliches „Herz" zu stellen sind:

1. „Rechts" und „links" müßten gut aufeinander abgestimmt sein, so daß die Auswurfleistung des rechten annähernd der des linken innerhalb eines 24-Stunden-Rhythmus entspricht.
2. Da gleichzeitig beide Herzen ersetzt werden müßten, wäre eine Doppelpumpe erforderlich.
3. Bei einer solchen Art von Herz müßte, um den Mehrerfordernissen bei der Arbeit zu genügen, sowohl die Pumpfrequenz (d. h. die Anzahl der Schläge) als auch die einzelne Auswurfleistung (das Schlagvolum oder Minutenvolum) stark variabel sein.
4. Der Einlauf oder der Vorhofdruck müßte in ganz bestimmten Grenzen gehalten werden, denn die Füllung des Vorhofes bestimmt ja die Auswurfleistung der dahinterliegenden Kammer. Hierbei wäre es nicht so sehr erforderlich, daß sich die Vorhöfe unbedingt verkleinern könnten, sondern eher, daß sie die Fähigkeit hätten, sich zu erweitern, um überhaupt das notwendige Blut aufnehmen zu können.
5. Die Auswurfleistung der rechten Kammer gegenüber der linken Kammer dürfte nicht zu stark variieren, da dies sonst zu Stauungen führen könnte.
6. Das künstliche Herz dürfte sich nicht zu stark erhitzen oder es müßte die Möglichkeit gegeben sein, daß die Wärme mit dem abführenden Strom sehr schnell dem Körper und der Lunge zugeführt würde, die beide dann als Kühler wirken könnten.
7. Das Herz sollte klein sein, leicht im Körper verankert werden können und vor allem wartungsfrei sein.

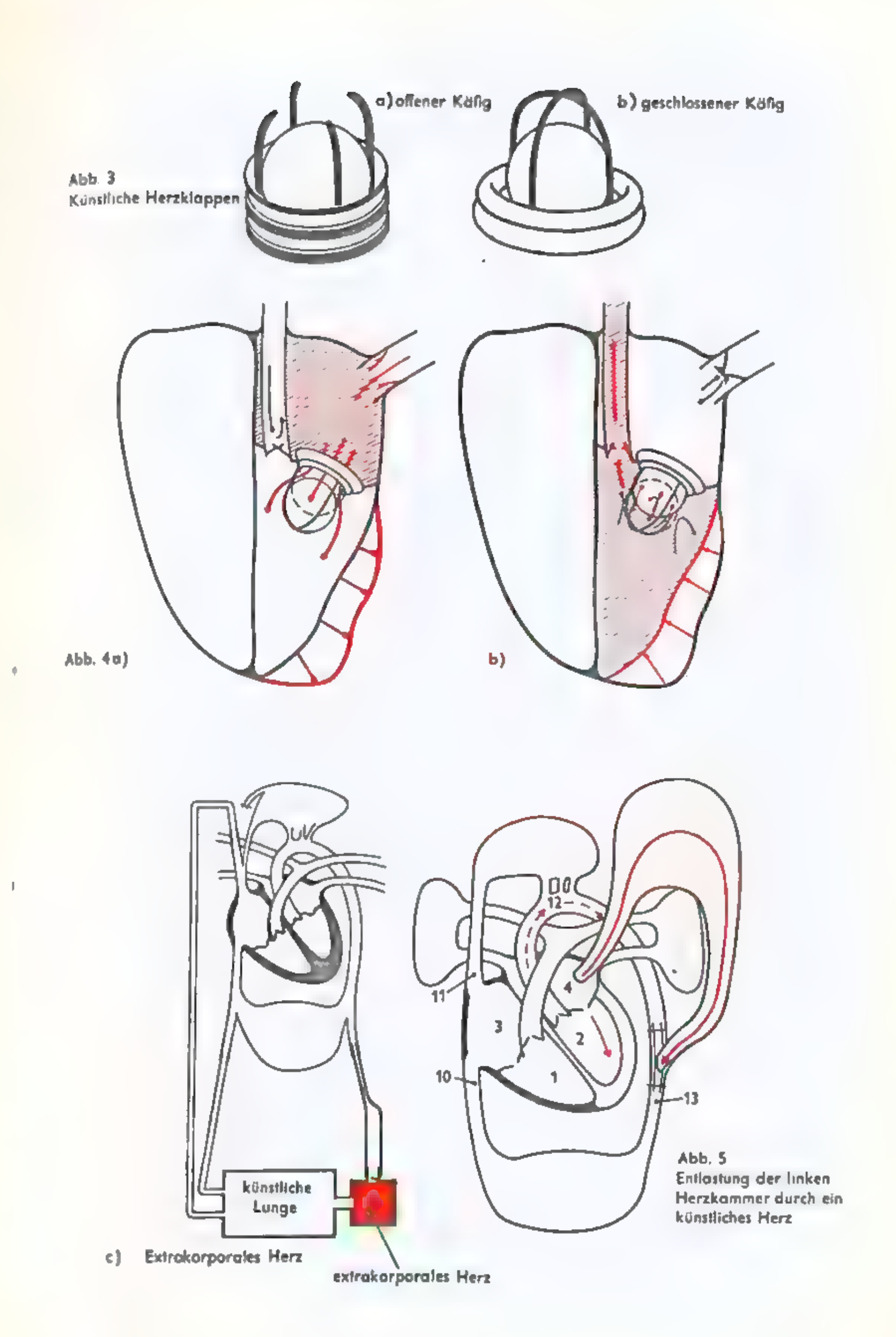


Abb. 3 Künstliche Herzklappen

Abb. 4a) b)

c) Extrakorporales Herz

Abb. 5 Entlastung der linken Herzkammer durch ein künstliches Herz

KÜNSTLICHES HERZ III

Allen diesen Anforderungen genügt das natürliche Herz selbst dann noch, wenn es aus dem Körper herausgenommen wird. Naheliegend war daher der Gedanke, einfach ein solches auf dem Wege der Übertragung (Transplantation) z. B. von einem eben an einem Unfall verstorbenen jungen Menschen einem schwer herzkranken Patienten einzuverleiben. Aber obwohl diese Herzen alle genannten Forderungen spielend erfüllen, sich darüber hinaus lange erhalten und – theoretisch – unbegrenzt lange schlagen, gehen sie zugrunde. Aber nicht etwa dadurch, daß sie absterben, sondern zufolge eines viel schwierigeren Problemes, an dem bisher die Wissenschaft gescheitert ist: den Abwehrreaktionen des empfangenden Organismus gegen jeden Fremdkörper. Diese Abwehrreaktionen bewirken, daß die übertragenen natürlichen Herzen kurze Zeit nach ihrer Einpflanzung von den Zellen des Empfängers im wahrsten Sinne des Wortes aufgefressen werden. Das ist auch der Grund, warum man versucht hat, künstliche Herzen zu schaffen.

Bei der Implantation eines künstlichen Herzens treten weitere Probleme hinzu:

1. Das Material, aus dem das Herz bestehen soll, darf für den Körper nicht als Fremdkörper wirken, d. h., es darf keine Abwehrreaktionen hervorrufen.
2. Das Material muß glatt sein, da sonst die vorbeiströmenden Blutkörperchen geschädigt würden, was schwere Thrombosen zur Folge hätte.
3. Das künstliche „Herz" darf sich im Körper nicht elektrostatisch aufladen, da dieses wiederum zu Blutgerinnseln führen könnte.

Erforderlich wäre also ein Kunststoff, der nicht als Fremdkörper wirkt – solche Stoffe gibt es heute bereits. Ebenso kann man die Veränderungen des Potentials dadurch verhindern, daß man eine Stromzuführung von außen anbringt, die diesen Schwankungen entgegenwirkt. Des weiteren kann man die Kunststoffherzen mit einem Kunststoff überziehen, der Heparin aufnehmen kann, wodurch das Blut ungerinnbar gemacht wird. Die Anforderungen, die an ein künstliches Herz, besser: an eine künstliche Blutpumpe, gestellt werden, sind damit nicht erschöpft. So darf die Pumpe z. B. nicht zu viel Blut ansaugen, da sonst die vor der Pumpe liegenden Gefäße kollabieren und damit jeglicher Blutumlauf zum Stillstand kommt. Die durch diese Probleme bedingte Mannigfaltigkeit der Faktoren und Konstanten, die zu überwachen sind, sind aber nicht mehr durch eine einfache menschliche Kontrolle zu bewältigen. Es wird eine automatische Kontrolleinrichtung notwendig, die z. B. das Absaugen und Wiedereinpumpen des Blutes reguliert, den Herzrhythmus einstellt, die Temperatur und das Schlagvolum überwacht usw.

Die funktionelle „Spaltung" des Herzens (Abb. 2, S. 429) ermöglicht es, in den Fällen, in denen nur eine Herzkammer ausfällt, die andere durch einen Umgehungskreislauf für einige Zeit zu ersetzen. Dies kann mit relativ einfachen Mitteln und ohne größeren Zeit- und Materialaufwand geschehen: man benötigt zum Einbau dieser „halben" Herzen noch nicht einmal eine Herz-Lungen-Maschine.

Die Abb. 5 zeigt die Umgehung des „linken" Herzens durch Einfügen einer künstlichen linken Herzkammer zwischen linkem Vorhof und Hauptschlagader. Hierdurch wird die natürliche Kammer wesentlich entlastet. Sie erhält Zeit, sich zu erholen. Nach einer gewissen Zeit kann man sie wieder entfernen; es liegen bereits Berichte vor, daß Patienten auf diese Weise gerettet werden konnten.

Bei Ersatz der rechten Herzkammer (Abb. 6) sind die Methoden etwas komplizierter, da ja die rechte Herzkammer nicht nur von zwei verschiedenen Venen, den beiden Sammelvenen, sondern auch noch von den Venen, die von den Herzkranzgefäßen kommen, Blut aufnehmen und an die Lungenarterie weitergeben muß. Die künstliche Kammer wird nach Art der eingegebenen Abbildung in die beiden Sammelblutadern und die Lungenschlagader eingepflanzt.

Zunächst versuchte man, durch Einpflanzung zweier Kammern nach und nach die Arbeit des gesamten Herzens zu ersetzen (Abb. 7); befriedigendere Ergebnisse für

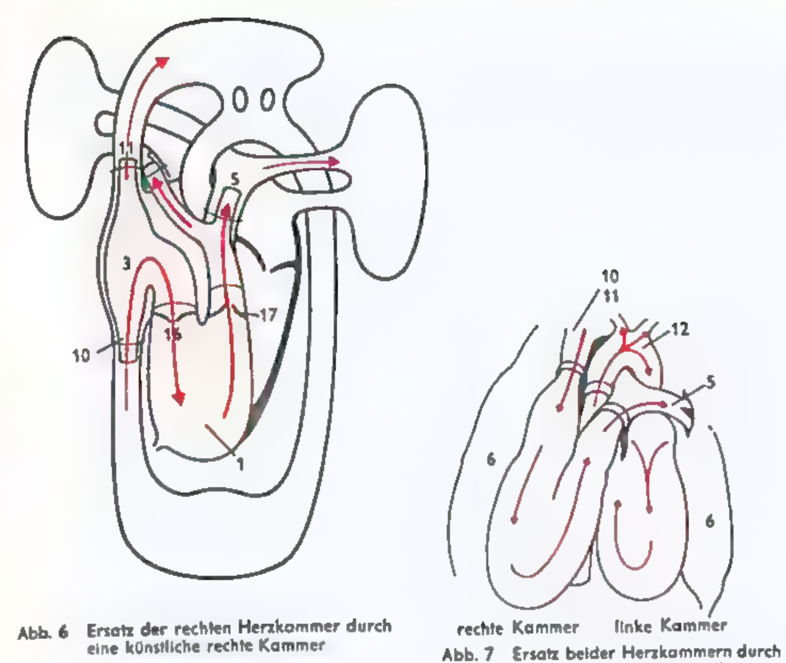


Abb. 6 Ersatz der rechten Herzkammer durch eine künstliche rechte Kammer

Abb. 7 Ersatz beider Herzkammern durch zwei getrennte künstliche Kammern

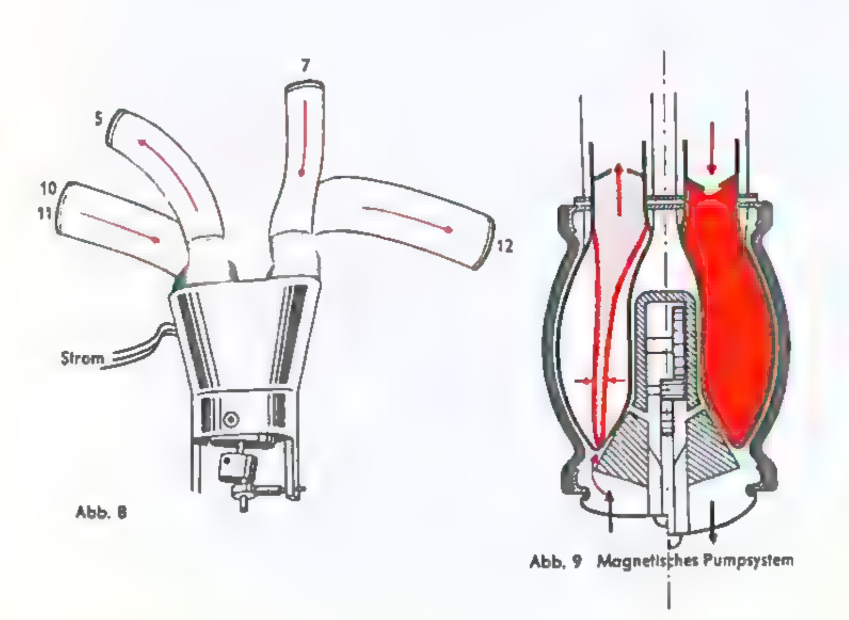


Abb. 8

Abb. 9 Magnetisches Pumpsystem

die Zukunft scheinen aber erst die künstlichen Herzen zu bringen, die auf kleinem Raum beide Kammern verbinden (Abb. 8).

Ein gewichtiges Problem bieten die Motoren für künstliche Herzen. Als Energie bietet sich wohl mit dem größten Wirkungseffekt der elektrische Strom an. Hierbei könnte man sogar auf die Zuleitungen verzichten, denn es gibt theoretisch Möglichkeiten, mit Hilfe von Radiowellen durch den geschlossenen Brustkorb hindurch kleine Elektromotoren anzutreiben. Dies Verfahren wurde aber bisher in der Praxis noch nicht realisiert, die meisten Herzen werden immer noch mit der dazugehörigen Batterie eingepflanzt oder durch Strom von außen gespeist.

Das Hauptproblem bei all diesen Apparaten stellt aber das Antriebsaggregat, die Pumpe, dar. Bisher wurden hierzu folgende Antriebssysteme entwickelt:

1. Apparate, die mit Atomenergie arbeiten. Sie tragen eine mit Isotopen beladene Kapsel und eine Miniaturdampfmaschine. Solche Kapseln, die bei Tieren bereits realisiert sind, können bei einem Gewicht von 400 Gramm wartungsfrei sein und etwa 2 Jahre ununterbrochen in Betrieb bleiben. Im Gewicht eingerechnet ist hierbei sogar der notwendige Strahlenschutzmantel.

2. Piezoelektrische Mechanismen. Zwischen zwei Kristallen könnte eine Pumpenkammer gebracht werden. Energieumwandlungen auf diese Art wären überraschend leistungsstark, und diese Pumpen scheinen vielversprechend, wenn auch erst in Zukunft.

3. Der Antrieb mit Hilfe von Elektromagneten (Abb. 9). Diese bestehen aus einer Magnetspule und einem Kern, der mit einer Membran verbunden ist. Zwischen Magnetenspule und Membran befindet sich eine Flüssigkeit. Bei Einschalten des Stromes zieht die Magnetspule den Kern in sich hinein und die Membran stößt, da sie diese Bewegung mitmachen muß, die Flüssigkeit in den Raum, der die beiden „Herzkammern" trägt. Hierdurch wird das Blut ausgestoßen. Bricht das elektrische Feld zusammen, schwingt die Spule durch die Membran zurück, die Flüssigkeit kehrt in den ursprünglichen Behälter zurück und gibt den Weg frei, so daß das Blut in die Kammern einströmen kann. Durch Zusammenschalten mehrerer solcher Systeme kann noch ein großerer Wirkungseffekt erzielt werden.

4. Der Antrieb durch Elektromotoren. Diese sind leistungsfähiger als Magneten. Man kennt fünf Typen von durch Elektromotoren betriebenen Herzen, wobei die ersten drei hauptsächlich zum Betrieb der in der Herz-Lungen-Maschine eingebauten extrakorporalen Herzen dienen:

a) Blutpumpen (Abb. 10), die nach Art des Fleischwolfes das Blut mit Hilfe eines schraubenförmigen Kernes gegen eine elastische Wand befördern;

b) Fingerpumpen (Abb. 11), die mit Hilfe einer Wellenbewegung, bei der fingerkuppenartige Maschinenelemente auf einen Plastikschlauch drücken, das Blut vorantreiben;

c) Ventilpumpen (Abb. 12); sie arbeiten mit einem Stempel, der das Blut aus den Plastikschläuchen herauspreßt, während die Ventile im Zweitaktverfahren dafür sorgen, daß das Blut nur von rechts nach links fließen kann;

d) Pendelpumpen (Pendelherzen; Abb. 8 und 13). Diese Pumpen komprimieren die beiden Kammern nicht gleichzeitig, sondern abwechselnd. Je nach Stellung des hin- und herpendelnden Kolbens wird die eine Kammer komprimiert, während in der anderen Kammer das Blut zuströmen kann und umgekehrt. Dies hat gewisse Vorteile. Der Energieverlust wird besser über den Arbeitszyklus verteilt. Man braucht einen kleineren Motor, d. h., er kann leichter sein und nimmt weniger Raum ein. Da darüber hinaus die Kammern, durch die das Blut fließt, direkt dem Elektromotor anliegen, wird zwar Wärme entstehen, diese aber durch die hohen Strömungsgeschwindigkeiten direkt an das Blut weitergegeben und die Gefahr der Überhitzung geringer;

e) Walzenpumpen (Rollenpumpen; Abb. 14). Hier treiben eine oder zwei Rollen an einem einarmigen Hebel das Blut vor sich her und damit in die Kammern hinein.

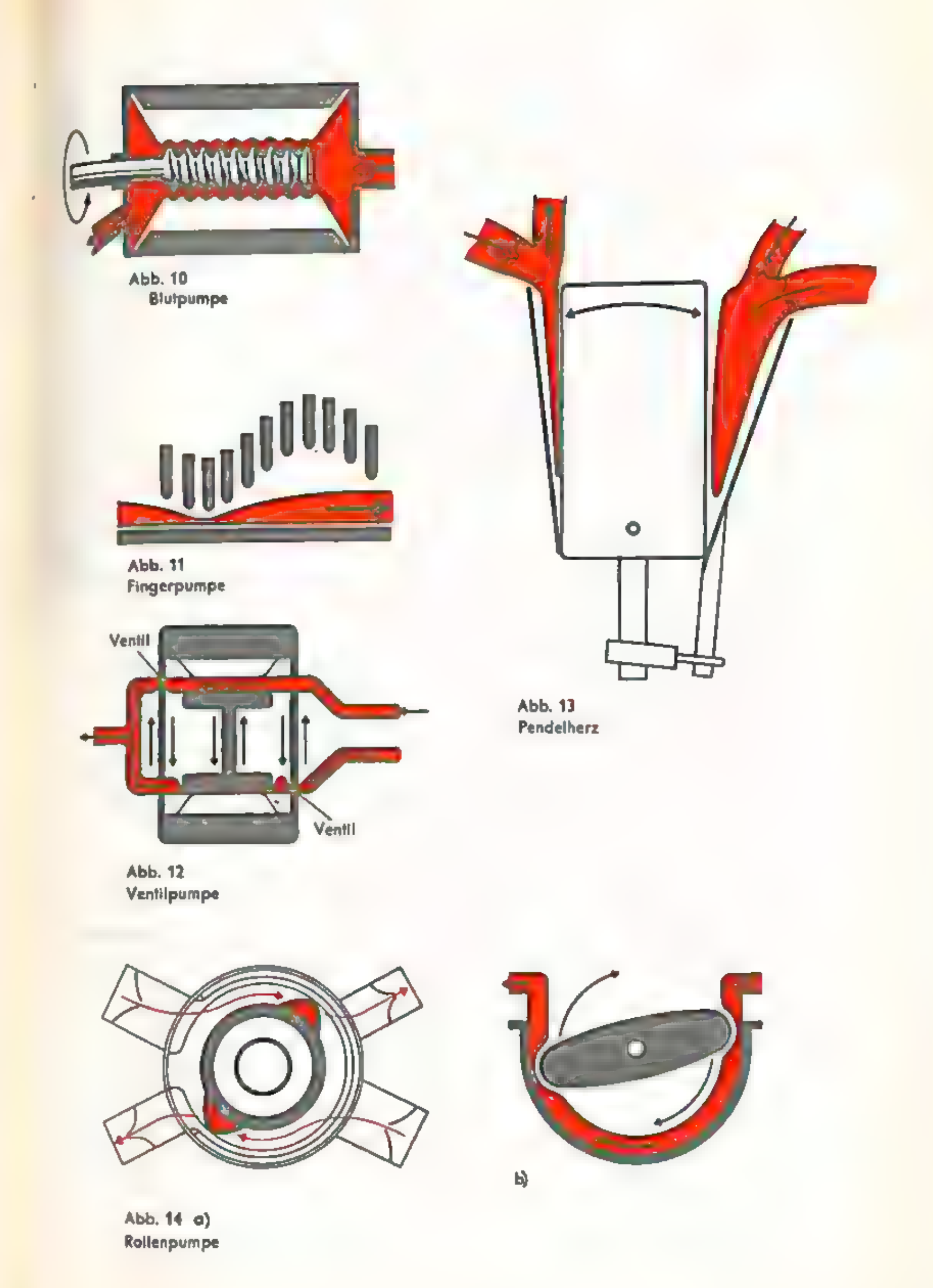


Abb. 10 Blutpumpe

Abb. 11 Fingerpumpe

Abb. 12 Ventilpumpe

Abb. 13 Pendelherz

Abb. 14 a) Rollenpumpe

Diese Pumpen bieten einen nicht zu unterschätzenden Vorteil: Sie benötigen kein Einlaßventil. Einlaßventile für künstliche Herzen mit niedrigem Einströmwiderstand sind schwer zu konstruieren. Die Walze der Rollenpumpe geht an der Öffnung zwischen Vorhof und Kammer vorbei und verhindert dadurch, daß sie das Blut vor sich her schiebt, den Rückfluß und erspart so das Einströmventil, das ja gegen diesen Rückfluß schützen soll. Gleichzeitig gibt sie unmittelbar hinter sich den Raum dafür frei, daß das Blut sofort nachströmen kann.

5. Mit komprimiertem Gas oder Luft angetriebene künstliche Herzen. Bei dieser Art Herzen liegt die Energiequelle außerhalb des Brustkorbes und kann auch dort reguliert werden. Sie eignen sich besonders zum Ersatz einzelner Herzkammern, da es leicht möglich ist, rechtes und linkes Herz zu trennen, was gleichzeitig eine Erleichterung beim Einsetzen in den Brustkorb bedeutet. Man unterscheidet zwei Typen dieser künstlichen Herzen:

a) Beutelherz (Abb. 15). Hierbei befindet sich ein Kunststoffbeutel in einem starren Behälter. Durch Hineinpumpen der Luft wird das Blut allmählich aus der künstlichen Kammer ausgetrieben. Beim Nachlassen des Drucks füllt sich die Kammer durch den entstehenden Sog von selbst. Beutelherzen nach Art der Abb. 15b werden meist in Herz-Lungen-Maschinen, die Beutelherzen nach Art der Abb. 15a im Brustraum verwendet.

b) Man kann ein künstliches Herz auch nach Art der Abb. 16 gestalten, wobei man die aus irgendeiner Quelle stammende komprimierte Luft über einen Druckregulator und ein Dreiwegeventil auf den Kolben der Kammer einwirken läßt. Diese Art der Anordnung gestattet es, die Frequenz des Herzens beliebig zu regulieren.

Mit der Erarbeitung der Pumpsysteme sind aber noch nicht die Anforderungen erschöpft, die an ein solches künstliches Herz gestellt werden müssen. Allein die Tatsache, daß es bisher nicht länger als zwei Tage gelang, ein Tier mit künstlichem Herzen am Leben zu erhalten, beweist die Schwierigkeit der Probleme, die sich hier ergeben. Wohl gelang es, durch kurz dauernden Ersatz einzelner Herzkammern – auch beim Menschen – Erfolge zu erzielen. Die Probleme, denen sich die Chirurgie beim Ersatz des ganzen Herzens stellen muß, sind derart kompliziert, daß bis zu ihrer Lösung noch ein weiter Weg zu gehen ist.

Die Schwierigkeiten sollen an einem relativ noch einfachen Problem aufgezeigt werden, das mit der Anordnung nach Abb. 17 gelöst werden sollte: Je nach dem Füllungsgrad der Herzkammern und dem sich bei der Austreibung des Blutes entgegenstellenden Widerstand verändert eine Herzkammer beim nächsten Schlag sowohl die Kraft des Auswurfes als auch die Menge des ausgeworfenen Blutes. Hierzu besitzt das Herz sehr feine Fühler, die diese Einregulierung garantieren. In der Technik hat man dieses System so nachgeahmt, daß man in den Stempel, der das Blut austreiben soll, einen Piezodirektübertragemittler (P) eingebaut hat. Dieser mißt die Beziehung zwischen der erzielten Spannung und dem ausgeworfenen Blutvolumen und reguliert damit den nächsten Schlag. Die Geräte, die zur Überwachung eines in ein Tier eingebauten künstlichen Herzens benötigt werden, füllen ein ganzes Laboratorium. Abb. 18 bringt eine stark vereinfachte Zeichnung, die die Arbeitsweise eines elektronischen Regulierungssystems für den Druckluftbetrieb eines Herzens zeigt. Das Schema zeigt drei ineinander vermaschte Regelkreise, bei denen jeder wieder die einzelnen Drücke, die Ventilstellung und die Kolbenlage an ein höheres Zentrum zurückmelden muß und dieses wieder veranlaßt, eine Neueinstellung des nächsten Herzschlages zu treffen; hierbei müssen die einzelnen Glieder dieses Systems wiederum als einzelne Rechenautomaten arbeiten.

Abb. zu diesem Teil nach Prof. W. J. Kolff, Cleveland.

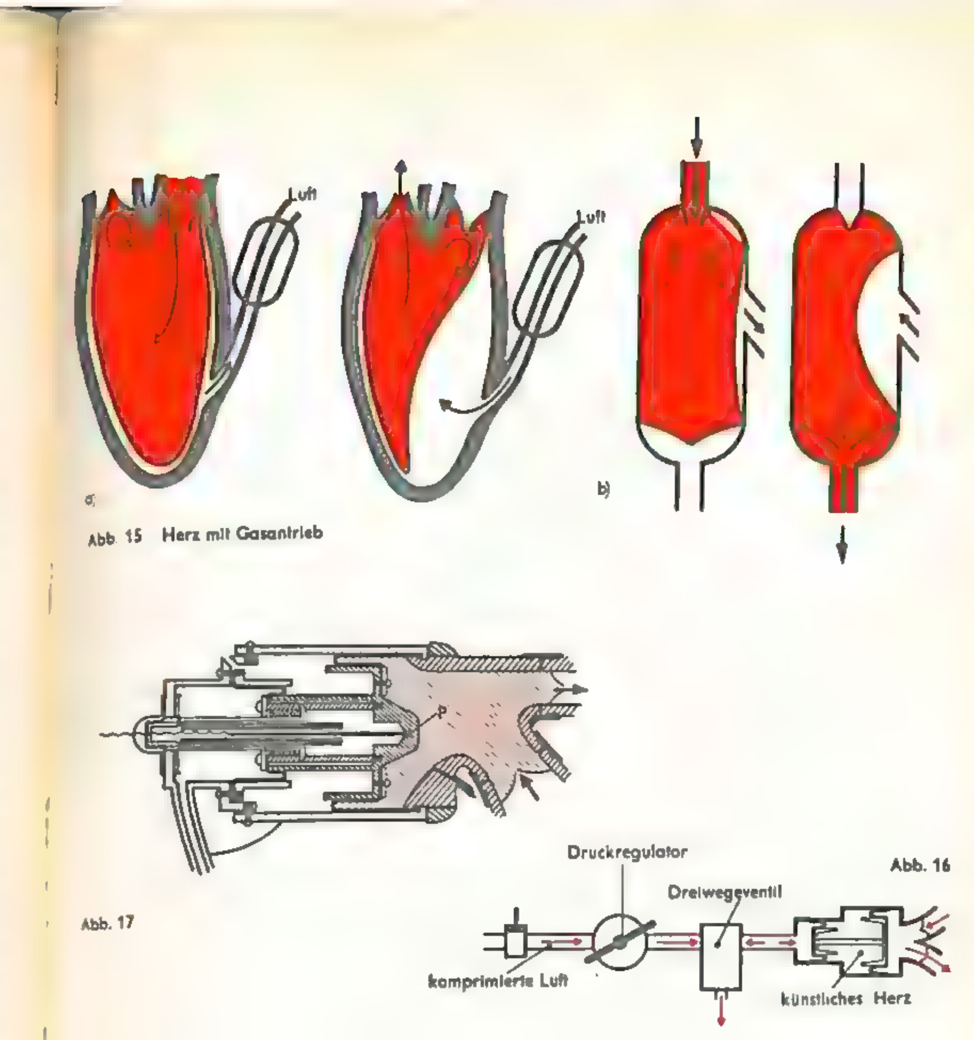


Abb. 15 Herz mit Gasantrieb

Abb. 17

Abb. 16

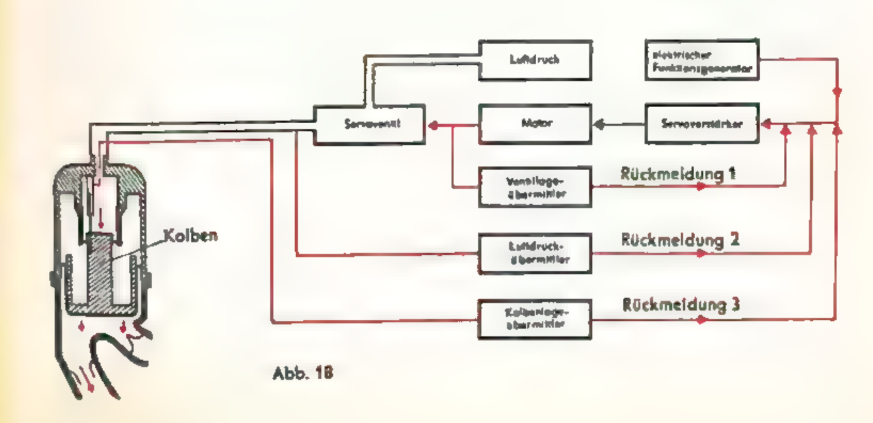


Abb. 18

UHR

Uhren dienen der Zeitmessung. Jeder periodisch sich wiederholende Vorgang kann zur Zeitmessung benutzt werden, wenn die Periodendauer mit ausreichender Genauigkeit erhalten bleibt. Bei älteren Uhren wird die periodische Bewegung von einem Pendel ausgeführt (Abb. 1). Das die Uhr antreibende Gewicht greift am Umfang der Welle an, so daß das Zahnrad sich drehen müßte; diese Drehbewegung verhindert jedoch der blockierende Anker. Er ist direkt und starr mit dem Pendel verbunden. Hat dieses seinen weitesten Ausschlag erreicht, gibt der eine Haken des Ankers einen Zahn des Zahnrades frei, so daß dieses sich ein Stück weiterdrehen kann. Diese ruckweise Drehbewegung wird über andere Zahnräder auf die Uhrzeiger übertragen. Damit das Pendel trotz der Reibungsverluste weiterschwingen kann, erhält es, wenn der Anker das Zahnrad freigibt, einen Stoß vom Antrieb (Zahnrad), ähnlich dem Anstoß bei einer Kinderschaukel, die immer gleich weit schwingen soll (Abb. 2). Durch Verschiebung der Pendelscheibe entlang der Aufhängestange wird die Frequenz des Pendels (Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit) verändert. Abwärtsschieben der Pendelscheibe führt zu einem langsameren, Aufwärtsschieben zu einem schnelleren Gang der Pendeluhr. Bei Taschen- und Armbanduhren wird die Funktion des Pendels von einer kreisformigen Schwungmasse, der sog. *Unruh* übernommen (Abb. 3). An der Welle der Unruh ist eine Spiralfeder befestigt, die den Ring in einer hin- und herschwingenden Bewegung hält. Der mit der Unruh verbundene Stift nimmt den Anker bei jeder Bewegung mit. Die Haken geben dann jeweils einen Zahn des Ankerrades frei, wodurch die Unruh wieder einen neuen Drehimpuls empfängt. In der Sekunde schwingt die Unruh fünfmal hin und her, d. h., der Sekundenzeiger macht pro Sekunde 5 kleine Sprünge vorwärts. An der Welle des Ankerrades greift die Federkraft der Aufzugsfeder als Antrieb an. An dieser Stelle wird auch der Antrieb für das Minuten- und das Stundenrad abgenommen.
In Abb. 4 ist gezeigt, wie die Bewegung der Minuten- und Stundenräder auf die Zeiger übertragen wird. Das Minutenrad wird vom Triebwerk in einer Stunde einmal ganz gedreht. Der große Zeiger (Minutenzeiger), der fest auf seiner Achse sitzt, dreht sich mit. Über das Wechselrad und den Wechseltrieb wird das Stundenrad dabei nur um ein Zwölftel seines Umfangs weitergedreht (Anzahl der Zähne der Räder); der kleine Zeiger bewegt sich somit ebenfalls nur um ein Zwölftel einer Umdrehung. Diese Bewegung erscheint auf dem Zifferblatt als Wanderung des kleinen Zeigers von einer Stundenziffer zur nächsten.



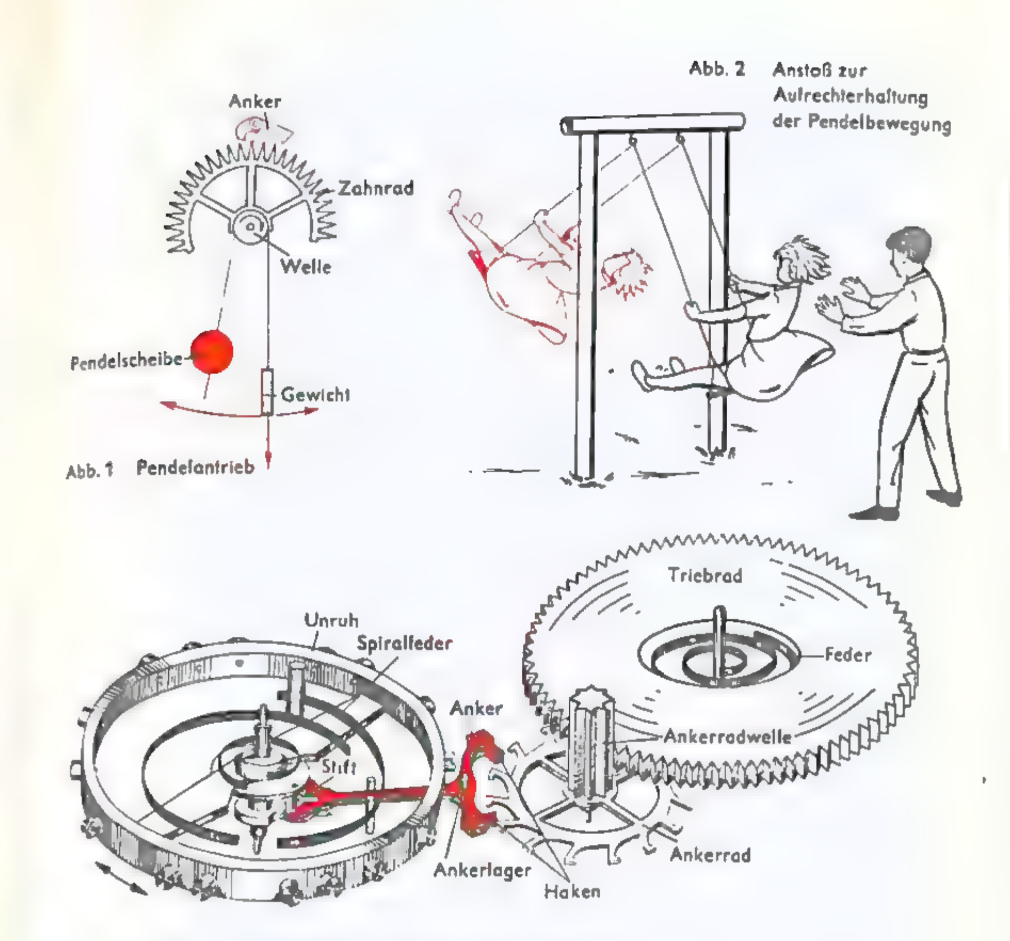


Abb. 1 Pendelantrieb

Abb. 2 Anstoß zur Aufrechterhaltung der Pendelbewegung

Abb. 3 Antriebssystem einer Taschen- oder Armbanduhr

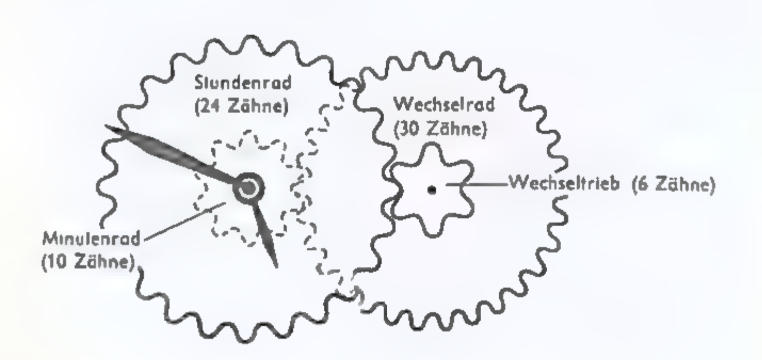


Abb. 4 Übertragung der Bewegung der Minuten- und Stundenräder auf die Zeiger

QUARZUHR

Jede Art der Zeitmessung besteht im Vergleich des Ablaufs eines beliebigen Vorganges mit dem eines periodisch verlaufenden Prozesses, sei es im primitivsten Falle der Vergleich mit dem Auslaufen eines Gefäßes, das man dann regelmäßig füllen oder – wie bei der Eiersanduhr bzw. dem Stundenglas – umdrehen muß, sei es der Vergleich mit dem Schwingungsvorgang eines Pendels bzw. einer Spiralfeder, wie sie zur Steuerung des Zeitablaufes unserer mechanischen Uhren im Perpendikel bzw. in der Unruh verwendet wird (vgl. S. 438).
Grundsätzlich kann man jeden periodisch verlaufenden Prozeß (Schwingungsvorgang) zur Steuerung eines Zeitmessers (Uhr) verwenden. Bei der sog. „Quarzuhr" sind es die „Dickenschwingungen", welche der Quarz unter besonderen Bedingungen ausführt. Um den Begriff der Dickenschwingung plausibel zu machen, kann man an ein ganz primitives Beispiel anknüpfen: Schlägt man mit einem Löffel auf einen Pudding (Abb. 1), so beginnt er zu „schwabbeln". Diese Bewegungen sind Dickenschwingungen. Schlägt man in einem den Abmessungen des Puddings angepaßten Rhythmus, so erreichen die Dickenschwingungen in ihrer Schwingungsweite (Amplitude) so hohe Werte, daß der Pudding sogar auseinanderfliegen kann. Den entsprechenden Effekt zeigt ein geeignet geschnittener Quarzkristall. Nur erfolgt die Anregung nicht mittels mechanischer Stöße, sondern durch periodische elektrische Aufladungen (Abb. 2). Man bedient sich dabei des sog. *piezoelektrischen Effektes*, der darin besteht, daß sich einerseits der Kristall unter mechanischem Druck bzw. Zug auflädt und andererseits bei elektrischer Aufladung ausdehnt bzw. zusammenzieht. Diese letztere Eigenschaft benutzt man dazu, den Kristall zu mechanisch-elastischen Dickenschwingungen anzuregen. Die Schwingungszahl (Frequenz) dieser Dickenschwingungen kann in weiten Grenzen – durch die Abmessungen des Quarzkristalls allein bestimmt – willkürlich gewählt werden. Sie weist dann aber eine außergewöhnliche Konstanz auf. Man kann daher durch Parallelschaltung zu einem elektrischen Schwingungskreis den „Schwingquarz" als äußerst zuverlässigen Regulator mit hoher Frequenzkonstanz verwenden (Abb. 3).
Die Quarzuhr besteht dann im Prinzip aus einem Röhren- (Abb. 4) oder Transistorsender (vgl. S. 304), dessen Schwingungskreis durch einen Quarz gesteuert wird. Am Ausgang A (Abb. 4) erhält man dann eine Wechselspannung hoher Frequenzkonstanz. Durch Frequenzuntersetzungsschaltungen oder über einen Hochfrequenzmotor läßt sich damit ein Uhrwerk normaler Bauart antreiben, welches nunmehr sehr exakte Zeitmessungen erlaubt. Seine Angaben sind innerhalb der Frequenztoleranzen der Dickenschwingungen des Quarzes konstant. Ein Vergleich von mehreren Quarzuhren verschiedener Bauart ergab nach monatelangen Beobachtungen Abweichungen von nur 1/10000 s. Quarzuhren haben im öffentlichen Zeitdienst und für die Konstanthaltung der Frequenzen von Rundfunksendern große Bedeutung erlangt.

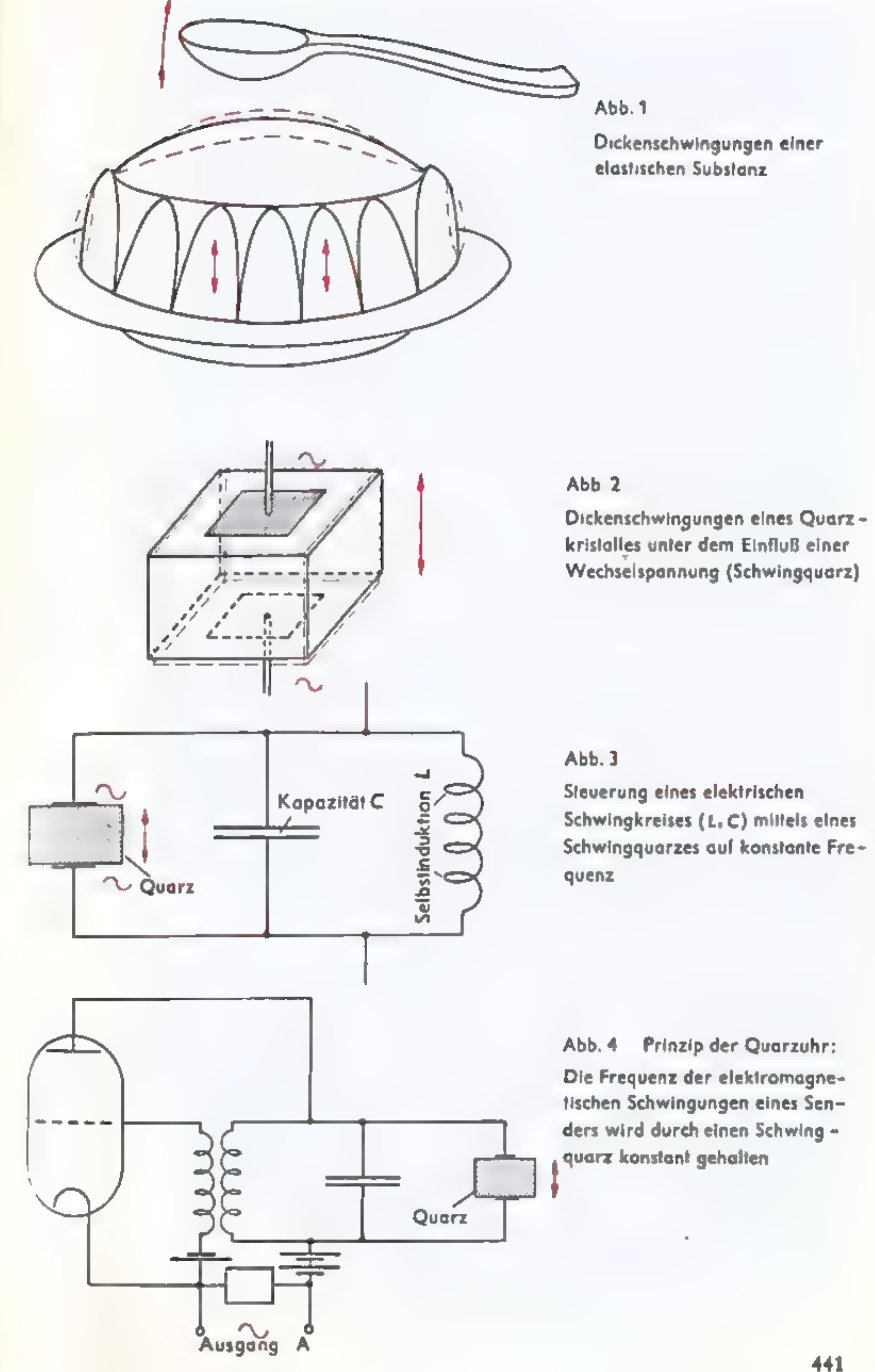


Abb. 1 Dickenschwingungen einer elastischen Substanz

Abb. 2 Dickenschwingungen eines Quarzkristalles unter dem Einfluß einer Wechselspannung (Schwingquarz)

Abb. 3 Steuerung eines elektrischen Schwingkreises (L, C) mittels eines Schwingquarzes auf konstante Frequenz

Abb. 4 Prinzip der Quarzuhr: Die Frequenz der elektromagnetischen Schwingungen eines Senders wird durch einen Schwingquarz konstant gehalten

ATOMUHR

Die Atomuhr ist z. Z. das genaueste Zeitmeßgerät. Während man mit Präzisionspendeluhren eine Genauigkeit von etwa 10^{-7} (das ist eine Schwankung von drei Sekunden im Jahr) erreicht hat, ist die Genauigkeit des meist verwendeten Zeitnormals, der Quarzuhr (s. S. 440), um den Faktor 100 bis 1000 größer. Quarzuhren haben jedoch den großen Nachteil, daß sich im Laufe einer langen Zeit ihre Schwingungsfrequenz ändert. Man muß also ihre Frequenz von Zeit zu Zeit kontrollieren bzw. neu einstellen. Das geschieht mit Hilfe der Atomuhren, bei denen Molekülschwingungen die Frequenz bestimmen, die zeitlich konstant bleibt. Die Genauigkeit der Atom- oder Moleküluhr liegt heute noch etwa um den Faktor 10 höher als die der Quarzuhr.

Das Arbeitsprinzip der Ammoniakmoleküluhr:

In eine Düse (links in der Abb. 1) wird gasförmiges Ammoniak (NH_3) eingeleitet. Von den vor der Düse in allen Richtungen willkürlich umherfliegenden Molekülen sondert die Düse, die aus vielen parallelen, sehr feinen Kanälen besteht, diejenigen aus, die zufällig nach rechts fliegen. Diese Moleküle geraten nun in den Fokussator, der aus mehreren (meistens vier) mit hohen Spannungen geladenen Metallzylindern besteht. Unter den NH_3-Molekülen gibt es solche mit größerem und andere mit kleinerem Energieinhalt. Beide Arten besitzen ein elektrisches Dipolmoment, d. h., sie richten sich aus, wenn man sie in ein elektrisches Feld bringt, und zwar so, daß die energiereichen sich *gegen* die Feldrichtung stellen, die energiearmen *in* die Feldrichtung. Diese Eigenschaften des NH_3-Moleküls machen es möglich, mit Hilfe des stark inhomogenen Feldes im Fokussator die energiereichen von den energiearmen Molekülen zu trennen, so daß die ersteren vom Feld in die Richtung der Strahlachse (Zentralbereich) gedrängt, die letzteren nach außen abgetrieben werden (Abb. 2). Die energiereichen Moleküle werden durch den Fokussator gesammelt und in einen Hohlraumresonator (s. S. 304) geleitet. Der Resonator ist ein metallener Kasten, in dem sich mit Hilfe einer Rückkopplungseinrichtung eine stehende Hochfrequenzwelle ausbilden kann. Die energiereichen NH_3-Moleküle geraten nun, durch diese Welle angeregt, in Schwingungen von etwa 24 GHz und geben dabei ihre Energie an die Welle ab, die dadurch aufgeschaukelt wird. Die Hochfrequenzenergie, deren Frequenz wegen der sehr scharfen Molekülschwingungsresonanz recht genau konstant ist, wird dann in Frequenzuntersetzerstufen verarbeitet und auf Zeitmeßgeräte verschiedener Art weitergegeben.

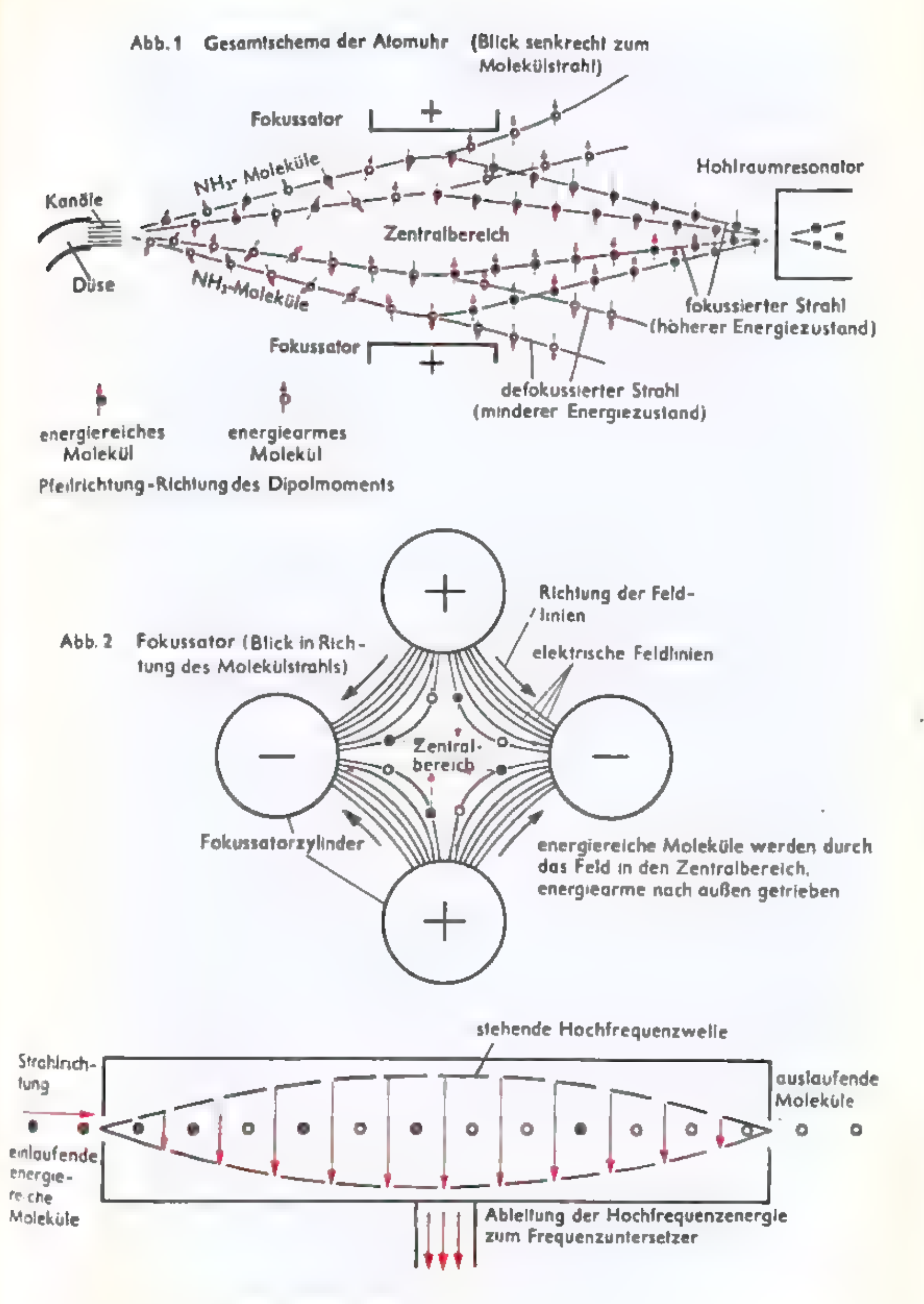


Abb. 1 Gesamtschema der Atomuhr (Blick senkrecht zum Molekülstrahl)

Abb. 2 Fokussator (Blick in Richtung des Molekülstrahls)

Abb. 3 Hohlraumresonator

WAAGEN

Die Kraft, mit der die Erde einen Körper anzieht, bezeichnet man als sein Gewicht. Diese Kraft ist der Masse (d. h. der Stoffmenge) des Körpers und der Schwerebeschleunigung proportional. Die Schwerebeschleunigung ist jedoch nicht an jedem Punkt der Erdoberfläche exakt gleich, sie nimmt vom Äquator zu den Polen hin ein wenig zu. So zeigt ein Körper, dessen Masse (Stoffmenge) stets gleich bleibt, an den Polen ein etwas größeres Gewicht als am Äquator. – Beim Wiegen mit einer Balkenwaage (Abb. 1) werden die Kräfte miteinander verglichen, mit denen die Erde die beiden Körper (auf der linken und rechten Waagschale) anzieht. Da diese Kräfte bei der gleichen Schwerebeschleunigung den Massen proportional sind, lassen sich mit einer Balkenwaage sowohl Gewichte als auch Massen mit entsprechenden Normalen (Einheiten) vergleichen.

Eine Waage in ihrer einfachsten Form ist die gleicharmige Balkenwaage (Abb. 1). Sie besteht aus einem in der Mitte auf einer Schneide drehbar gelagerten Waagebalken. Im Drehpunkt der Waage ist ein mit dem Balken fest verbundener Zeiger angebracht, die sog. Zunge, die bei Gleichgewicht senkrecht nach unten zeigt (Abb. 1a). Für das einwandfreie Funktionieren einer Waage ist es notwendig, daß der Schwerpunkt des Balkens tiefer als der Drehpunkt des Balkens liegt. Aus diesem Grunde ist an der Zunge eine in der Senkrechten verschiebbare Masse angebracht. Der Waagebalken ist im Gleichgewicht, wenn das linksdrehende Moment gleich dem rechtsdrehenden Moment ist, das heißt, wenn Kraft × Kraftarm gleich Last × Lastarm ist. Da Lastarm und Kraftarm gleich lang sind, zeigt die Zunge nur dann senkrecht nach unten, wenn die auf der einen Seite liegenden Gewichtsstücke genau so schwer sind wie der zu wiegende Körper auf der anderen Seite. Die Empfindlichkeit der Waage ist um so geringer, je tiefer der Schwerpunkt des Waagebalkens liegt. Aus Abb. 1b ist ersichtlich, daß bei tieferem Anbringen des Schiebegewichts bei derselben Waagebalkenstellung der Hebelarm des Schiebegewichtes von a auf b vergrößert würde. Der Waagebalken dreht sich, bis $b = a$ wird, was zu einer Verkleinerung des Ausschlags bei gleichem Übergewicht führt.

Da die gleicharmige Balkenwaage nur einen Gewichts- oder Massenvergleich zuläßt, benötigt man einen Gewichtssatz, der mindestens so schwer wie der zu wiegende Gegenstand ist. Deshalb benutzt man zum Wiegen schwerer Gegenstände Waagen, die verschieden lange Hebelarme besitzen. Bringt man die Gewichtsstücke am langen, die Last aber am kurzen Hebelarm an, so genügen Gewichtsstücke, die zur Last im umgekehrten Verhältnis wie die entsprechenden Hebelarme stehen (vgl. S. 242). Bei der Brückenwaage nach Abb. 2 macht das aufzulegende Gewichtsstück nur $^1/_{10}$ der aufgelegten Last aus, wenn $l = 10 \times a$ und das Verhältnis $a : b = c : d$ gemacht wird. Eine Wiegependelwaage (Abb. 3), die z. B. in Lebensmittelgeschäften verwendet wird, besitzt an Stelle der Waagschale der Brückenwaage ein Wiegependel. Bei Belastung der Brücke ist der Ausschlag des Wiegependels und des damit fest verbundenen Zeigers ein Maß für die aufgelegte Last. Zur Veränderung des Gewichtsbereiches kann ein Laufgewicht an einem Hebel verschoben werden. Eine Variation dieser Waage ist die Leuchtbildwaage. Hier trägt das Wiegependel eine kreisbogenförmige Skala, die bei Bewegung des Pendels an einer Projektionsoptik vorbeiläuft. Dadurch wird der Skalenteil, der gerade vor der Optik ist, auf eine Mattscheibe projiziert und dabei auf das Fünfzigfache vergrößert.

Bei der Briefwaage in Abb. 4 bilden die zwischen den einzelnen Drehpunkten angebrachten Stäbe in jeder Stellung ein Parallelogramm. Bei Belastung des Tellers vergrößert das Gewicht seinen Hebelarm in Bezug auf den Drehpunkt, so daß der Ausschlag ein Maß für die aufgelegte Belastung ist.

Ein anderer Waagentyp ist die Federwaage (Abb. 5), deren Federlängung von der Größe der angehängten Last abhängig ist, so daß die Skala direkt in Gewichtseinheiten geeicht werden kann. Federwaagen sind auch die im Haushalt verwendeten Personenwaagen, bei denen die Längung der Feder durch einen Zeiger auf eine in Gewichtseinheiten geeichte Skala übertragen wird (Abb. 6).

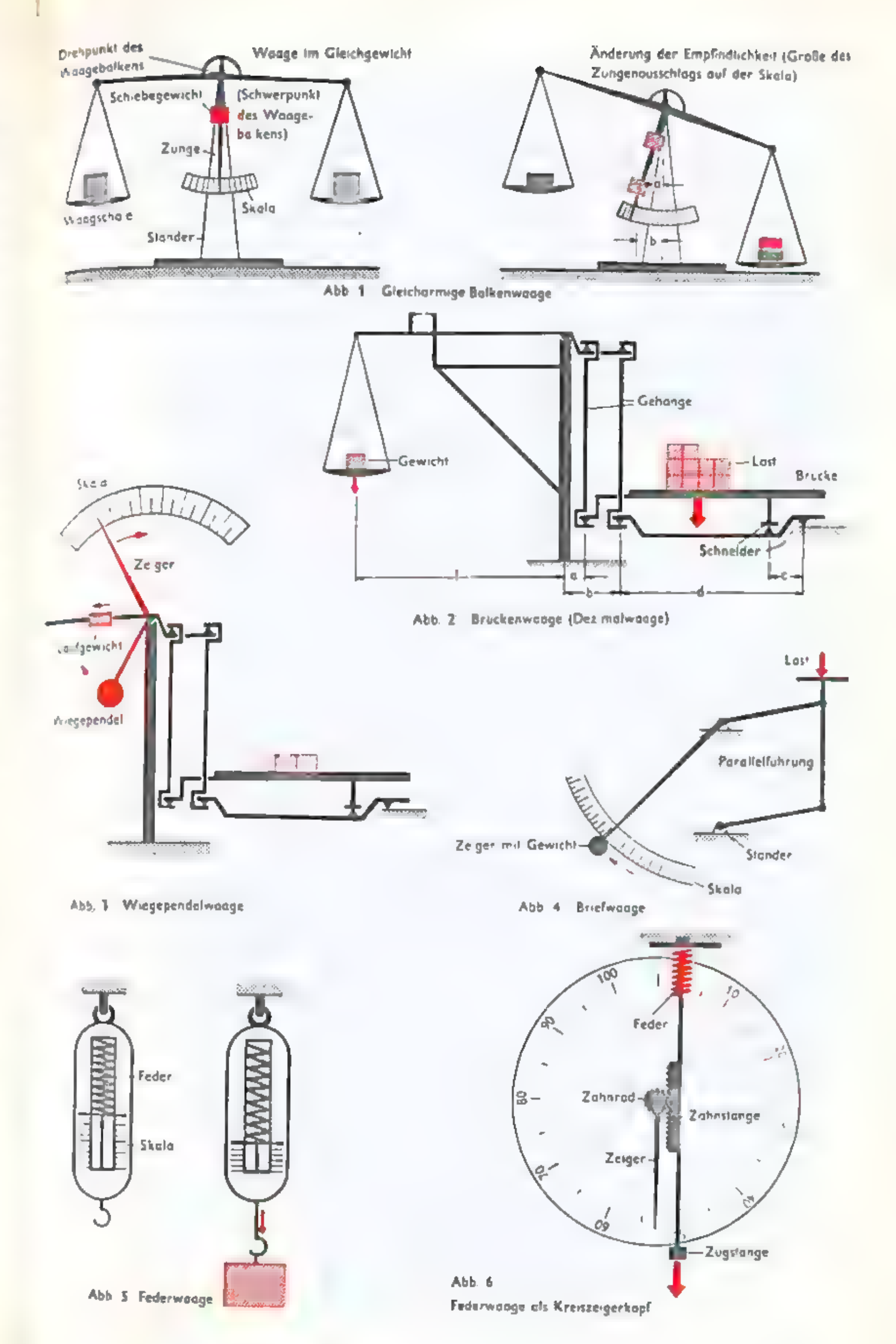


Abb. 1 Gleicharmige Balkenwaage

Abb. 2 Brückenwaage (Dezimalwaage)

Abb. 3 Wiegependelwaage

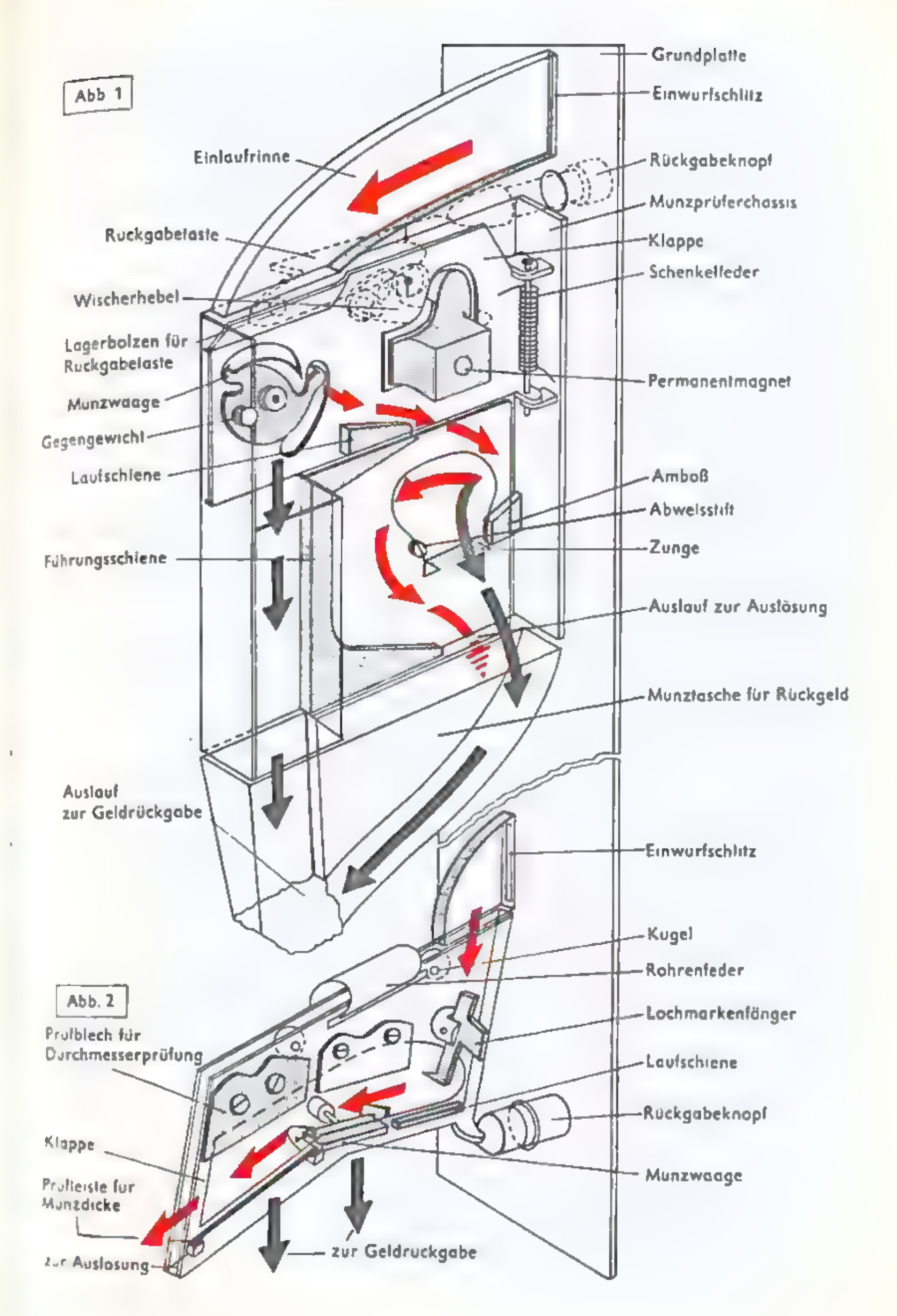
Abb. 4 Briefwaage

Abb. 5 Federwaage

Abb. 6 Federwaage als Kreiszeigerkopf

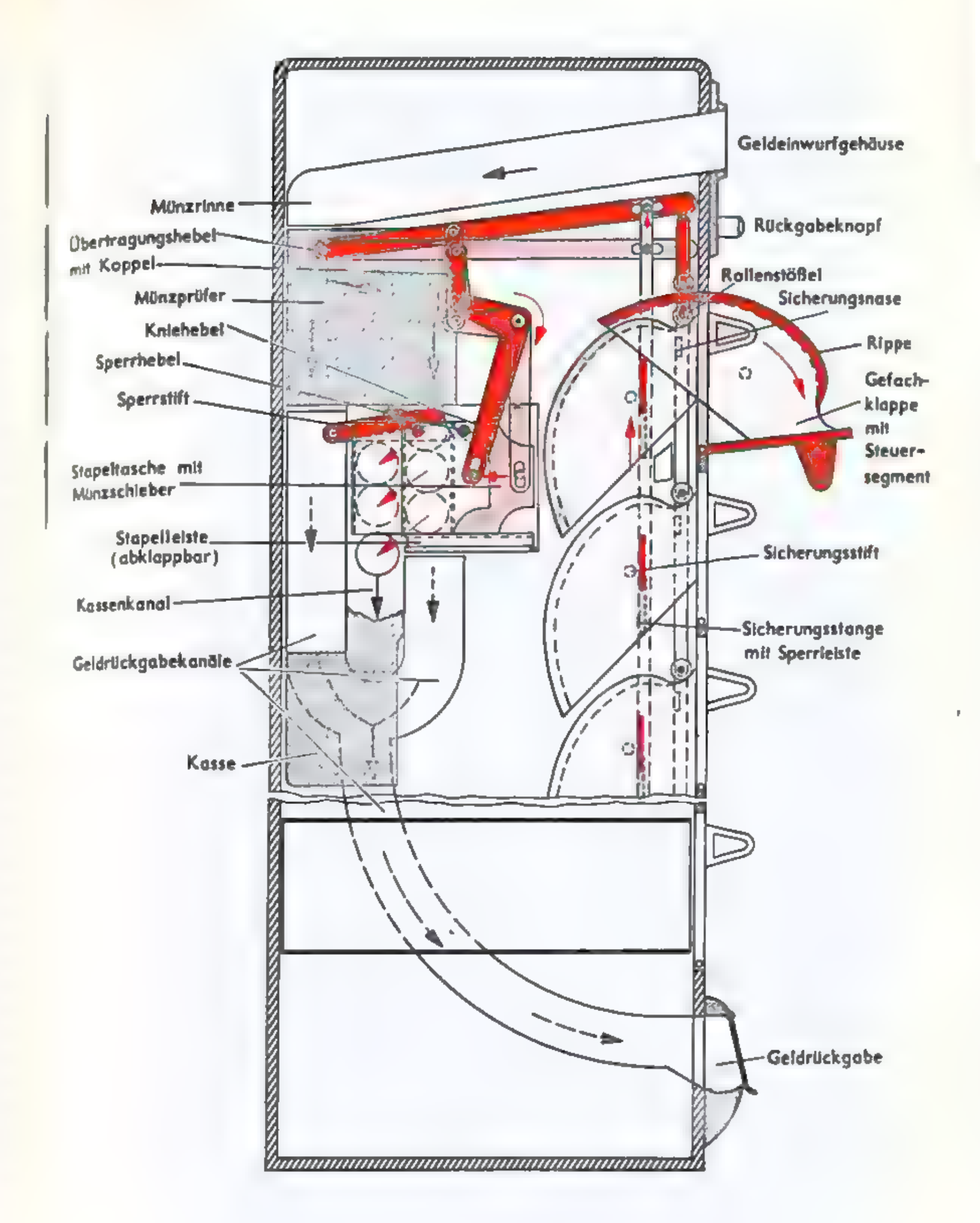
AUTOMATEN (MÜNZPRÜFER)

Zu den wenigen allen Automaten gemeinsamen Bauelementen gehört der Münzprüfer, der unterwertige oder falsche Münzen ausscheidet, bevor sie den Sperrmechanismus auslösen können. Jeder Münzprüfer prüft das einlaufende Geldstück zumindest auf Durchmesser und Stärke; weitere Prüfungen beziehen sich auf Gewicht, Legierung und magnetische Eigenschaften. Meist ist noch ein Lochmarkenfänger vorhanden. Abb. 1 zeigt einen Münzprüfer für Neusilbermünzen. Die eingeworfene Münze rollt durch die Einlaufrinne auf eine Münzwaage, nachdem durch den genau kalibrierten Einwurfschlitz bereits zu große oder zu dicke Münzen zurückgehalten wurden. Die Münzwaage hat bei dieser Bauart eine Doppelfunktion: Die beiden hakenförmig umgebogenen Enden des Waagebalkens sind genau so weit voneinander entfernt, daß die im Durchmesser passende Münze ihr Gewicht auf den (im Bild) rechten Waagebalken verlagert und diesen niederdrückt. Münzen mit kleinerem Durchmesser fallen zwischen den Haken hindurch in die Geldrückgabe (schwarze Pfeile). Münzen mit größerem Durchmesser bleiben zwar auf ihnen liegen, da aber ihr Schwerpunkt genau mit dem Drehpunkt der Waage zusammenfällt, können sie diese nicht in Drehung versetzen. Durch Drücken des Rückgabeknopfes muß nun die Klappe des Münzprüfers abgeschwenkt werden, damit die liegengebliebene Münze seitlich abkippen und gleichfalls in die Geldrückgabe laufen kann. Das Gegengewicht auf dem (im Bild) linken Waagebalken sorgt dafür, daß nur eine Münze mit einem mindestens gleichgroßen Gewicht passieren kann. Die „richtige" Münze drückt nun den rechten Waagebalken nach unten und läuft auf einer kurzen geneigten Laufschiene durch das Magnetfeld eines starken Permanentmagneten. Hier wird eine Münze je nach Legierung durchlaufen oder abgebremst werden; sie kann auch – bei höherem Eisengehalt – festgehalten werden. Dann muß der Benutzer durch Betätigen des Rückgabeknopfes, der mit einem Wischerhebel zum Losreißen der festgehaltenen eisenhaltigen Münze verbunden ist, die Klappe ausschwenken, um die Münze zum Abfall zu bringen. Hat die Münze den Permanentmagneten passiert, so fällt sie auf einen Amboß. Nur wenn sie die richtige Masse (abhängig von der Legierung), die richtige Rollgeschwindigkeit (abhängig von der Verzögerung durch das Magnetfeld) und damit eine genau festgelegte kinetische Energie besitzt, kann sie nunmehr über den Abweisstift hinwegspringen (roter Pfeil) und auf die Führungsschiene in den Auslösekanal rollen. Münzen, welche diese Bedingung nicht erfüllen, stoßen gegen den Abweisstift und fallen über eine Zunge, die in den Münzkanal ragt, in die Rückgeld-Münztasche. Neben dieser Bauart ist speziell für Scheidemünzen aus plattiertem Stahlblech eine in Abb. 2 gezeigte Ausführung weit verbreitet. Nach der Vorprüfung durch den Einwurfschlitz fällt die Münze an einem Lochmarkenfänger vorbei, der mit einer in die Münzbahn ragenden Nase derartige Marken zurückhalten würde. Die Münze rollt nun auf einer leicht ansteigenden Laufschiene vorwärts (roter Pfeil); deren Steigung ist so gewählt, daß nur Münzen mit ausreichender Bewegungsenergie weiterrollen, während insbesondere zu leichte Münzen stehenbleiben. Die nächste Prüfstation ist die Münzwaage. Da deren Drehachse in Richtung der Laufschiene liegt, wirkt sie wie eine Fallklappe: zu schwere Münzen (das zulässige Höchstgewicht wird durch ein Gegengewicht bestimmt) „brechen durch" und fallen nach unten ab (schwarzer Pfeil). Auf den nächsten Etappen werden Durchmesser und Stärke der Münze geprüft. Der ganze Münzprüfer ist nicht genau lotrecht, sondern zur Seite geneigt eingebaut. Dadurch laufen die Münzen stets mit dem Rand an einem oder mehreren Prüfblechen entlang, die so eingestellt sind, daß Münzen mit zu kleinem Durchmesser nicht mehr geführt werden und seitlich herauskippen. Die Prüfung der Münzdicke erfolgt auf einer Prüfleiste, die nur an den Enden die normale Laufschienenbreite besitzt, dazwischen aber bis auf einen schmalen Steg offen ist. Der so entstehende Schlitz läßt zu dünne Münzen durchfallen (schwarzer Pfeil).



GEFACHAUTOMATEN

Gefachautomaten gehören wegen ihrer vielfältigen Verwendbarkeit zu den beliebtesten und meistverbreiteten Warenautomaten. Kennzeichen dieser Automatenart sind die einzelnen Warenfächer („Gefache“), die fest oder auch in Form einer drehbaren „Gefachsäule“ in das Automatengehäuse eingebaut sind und jede passende Ware, ob verpackt oder unverpackt, aufnehmen können. Da jedes Gefach unabhängig vom anderen gefüllt wird, bietet ein Gefachautomat sehr große Auswahlmöglichkeiten. Das Füllwarensortiment reicht von belegten Brötchen über Schnittblumen bis zu Dosenmilch und Damenstrümpfen. Zugänglich werden diese Waren nach Öffnen der einzelnen Gefachklappen, welche die Gefache nach vorn abschließen. Die Gefachklappen werden durch einen Sperrmechanismus verriegelt, der erst durch Einwurf des vorgeschriebenen Geldbetrages ausgelöst wird. Die Abb. zeigt das Arbeitsprinzip einer mechanischen Bauart. Die einzelnen Gefache sind in einer Reihe untereinander im Automatengehäuse fest eingebaut und durch Klappen, die aus Metallrahmen mit eingelassener Glasscheibe bestehen, verschlossen. Mit jeder Gefachklappe ist ein seitlich angeordnetes Steuersegment verbunden, das als Schubkurve auf einen Rollenstößel wirkt. Wird nun nach Einwurf der vorgeschriebenen Münzen (in der Abb. drei Geldstücke gleichen Wertes) eine Gefachklappe gezogen, so drückt das Steuersegment den ihm zugeordneten Rollenstößel nach oben. Dessen Hubbewegung wird — bei den unteren Gefachklappen durch Zwischenschaltung aller darüberliegenden Rollenstößel — auf einen Übertragungshebel weitergeleitet, der die vertikale Hubbewegung in eine Drehbewegung umwandelt und mittels einer Koppel auf einen zweiarmigen Kniehebel überträgt. Dieser greift mit einem Langloch in den Zapfen des Münzschiebers der Stapeltasche und läßt ihn eine horizontale, geradlinige Schubbewegung ausführen. Liegen alle Münzen im Schieber, so wird durch die zuoberst liegende Münze der Sperrhebel an einer Zunge, die in die Münzbahn hineinragt, angehoben. Der Münzschieber kann nun ungehindert bis zu seiner Hubbegrenzung vorlaufen (wobei gleichzeitig die Münzen in den Kassenkanal abfallen), er ermöglicht das vollständige Öffnen der Gefachklappe. Sind dagegen keine oder zuwenig Münzen eingeworfen worden, so läuft der Münzschieber schon nach wenigen Millimetern mit einem Sperrstift gegen die Vorderkante des Sperrhebels an und blockiert damit die weitere Bewegung aller Übertragungselemente einschließlich der Gefachklappe. In diesem Falle können eingeworfene Teilbeträge durch totale Münzrückgabe zurückerstattet werden: Beim Niederdrücken des Rückgabeknopfes wird die Stapelleiste aufgeklappt und entläßt die Münzen, welche nicht zur Auslösung ausreichen, in die Geldrückgabe. Neben diesen Bauelementen, welche für die normale Funktion des Automaten notwendig sind, müssen jedoch noch Einrichtungen gegen mißbräuchliche Benutzung vorhanden sein. Es wird vor allem der Versuch gemacht, nach dem Geldeinwurf zwei oder mehrere Gefache zu öffnen. Dies wird durch eine Rippe am Rande eines jeden Steuersegments verhindert. Beim Ausschwenken eines Steuersegments schiebt sie sich vor die Nase des darunter befindlichen Rollenstößels, blockiert diesen und unterbindet dadurch zwangsläufig das gleichzeitige Öffnen der übrigen Gefachklappen. Nach dem Öffnen einer Gefachklappe vereitelt außerdem eine zusätzliche Sicherungsstange weitere Öffnungsversuche. Diese Sicherungsstange ist am Übertragungshebel angelenkt und reicht bis zur untersten Gefachklappe. In Höhe des Sicherungsstifts, etwa in der Mitte eines jeden Steuersegments, befindet sich auf ihr eine Sperrleiste, die beim Aufwärtshub die übrigen, noch geschlossenen Gefachklappen blockiert. — Zigarettenautomaten arbeiten ebenfalls nach dem hier geschilderten Prinzip, nur sind statt der Gefache Schubkästen vorhanden, die durch einen Warenschacht mit übereinandergestapelten Warenpackungen selbsttätig nachgefüllt werden.



SPIELAUTOMATEN

Die durch Münzeinwurf betriebenen Spielautomaten teilt man ein in mechanisch betriebene Spielgeräte mit und ohne Gewinnausspielung. Erstere werden als Geldspielautomaten, letztere als Unterhaltungsautomaten bezeichnet. Die Geldspielautomaten sind strengen Prüf- und Zulassungsvorschriften unterworfen. Diese beziehen sich insbesondere auf Höchsteinsatz und -gewinn, Spieldauer, Gewinnchance und Gewinnverhältnis (mindestens 60% der Summe der Einsätze). Aus der großen Zahl der Geldspielautomaten ragt eine Bauart hervor, die in zahlreichen Varianten gefertigt wird (Dreiwalzen- bzw. Dreischeibengeräte (s. Abb. 1). Bei diesen Geräten werden die Walzen oder Scheiben nach Geldeinwurf mechanisch oder elektrisch in Rotation versetzt und nacheinander abgebremst, wobei die nach dem Stillstand sich ergebende Kombination von Zahlen, Symbolen oder anderen Merkmalen nach einem festliegenden Gewinnplan über Gewinn oder Verlust entscheidet. Abbildung 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines elektrischen Dreischeibengeräts. Die drei Zahlenscheiben sind lose drehbar auf je einer Achse in einer Zwischenwand des Automaten gelagert und so angeordnet, daß beim Stillstand eine dreistellige Zahlenkombination in einem Sichtfenster erscheint. Als Antrieb dient ein Elektro-Kleinmotor, der beim Einwurf der Münze durch einen Mikroschalter im Münzkanal eingeschaltet wird. Dieser Motor treibt über ein Zwischengetriebe und drei als Rutschkupplungen ausgebildete, auf einer gemeinsamen Antriebswelle sitzende Riemenscheiben mit je einer endlosen Federspirale die Scheiben an. Außerdem wird gleichzeitig ein Nockenschaltwerk angetrieben, das den Spielablauf steuert. Die Übersetzung der Schaltwerkswelle ist so ausgelegt, daß die Nockenscheiben genau eine Umdrehung pro Spieldauer, also z. B. eine Umdrehung in 15 Sekunden, ausführen. Die Abbremsung der drei Scheiben erfolgt nacheinander durch Unterbrechung des Erregerstromes von jeweils einem zugehörigen Bremsrelais durch das Schaltwerk. Eine Feder drückt einen mit dem Anker des Bremsrelais verbundenen Bremsstift gegen die Nabe der Zahlenscheibe, welche mit radialen Haltestiften besetzt ist. Der Bremsstift rastet zwischen zwei Haltestiften ein und bringt die Zahlenscheibe schlagartig zum Stillstand. Der Spieler kann diesen Vorgang auch vorzeitig und willkürlich durch Betätigen eines Tastschalters auslösen, der als Unterbrecher arbeitet und das betroffene Bremsrelais in gleicher Weise stromlos macht. Umgekehrt kann bei einem als Schließer wirkenden Tastschalter eine Scheibe wieder gestartet werden.

Sind alle drei Scheiben zum Stillstand gekommen (der Motor läuft noch kurze Zeit weiter, um das Schaltwerk für den Überprüfungs- und Auszahlungsvorgang anzutreiben), so wird durch die ringförmig auf jeder Zahlenscheibennabe angeordneten Kontakte durch Reihenschaltung eine Strombrücke zwischen den drei Zahlenscheiben hergestellt, wenn diese eine Gewinnkombination aufweisen. In der Regel wird der Stromweg schon durch die beiden ersten Zahlenscheiben vorbestimmt, während die Stellung der dritten Zahlenscheibe nur über die Gewinnhöhe entscheidet. Dies geschieht dadurch, daß die den verschiedenen Zahlen der letzten Scheibe entsprechenden Kontakte den Strom, der von den beiden ersten Zahlenscheiben zugeführt wurde, an Nockenscheiben mit ungleich langen Nocken weiterleiten. Die daraus resultierende unterschiedlich lange Dauer des Stromstoßes bestimmt wiederum die Zahl der Auszahlimpulse, die von einer weiteren Nockenscheibe mit gleich großen und in gleichen Abständen aufeinanderfolgenden Nokken erzeugt und an den Auszahlmagneten weitergeleitet werden. Dieser betätigt einen Schieber, der die in einer Zahlröhre gestapelten Münzen auswirft. Meist ist der Schieber für die Aufnahme von zwei Münzen eingerichtet: ein Auszahlimpuls der zuletzt genannten Nockenscheibe entspricht also einem Gewinn von 2 Münzen, 5 Impulse einem Gewinn von 10 Münzen. Die Erstfüllung der Zahlröhre muß durch den Aufsteller des Gerätes erfolgen; später füllen die eingeworfenen Münzen die Zahlröhre nach; erst der Überschuß wandert in die Automatenkasse.

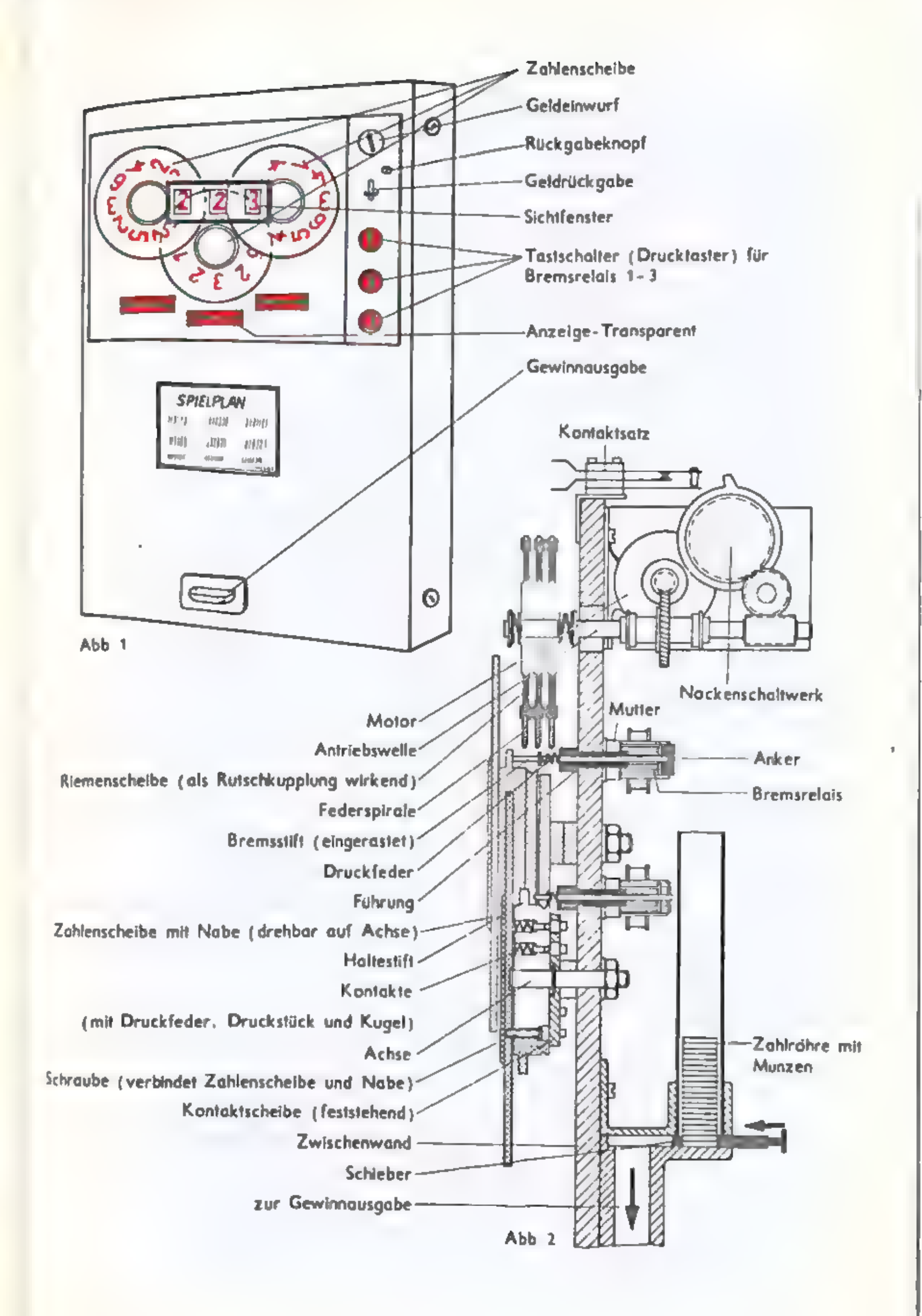


Abb 1

Abb 2

MUSIKAUTOMATEN I

Musikautomaten werden zur Wiedergabe von Musikstücken gegen Münzeinwurf hauptsächlich in Innenräumen verwendet. Bei den heute üblichen Musikautomaten sind fast ausschließlich handelsübliche 17-cm-Schallplatten in Gebrauch, die mit 45 U/min abgespielt werden. Andere Tonträger, z. B. Magnettonbänder oder -draht, haben sich nicht durchgesetzt. Die Zahl der stets beidseitig abspielbaren Schallplatten in einem Musikautomaten liegt meist zwischen 30 und 100.

Folgende Bauelemente findet man bei allen derartigen Musikautomaten (Abb. 1): Schallplattenmagazin bzw. Stapelvorrichtung, Abspielaggregat, Programmtafel, Wählvorrichtung (meist als Tastatur ausgebildet), Münzprüfer und Münzspeicherwerk (zur Registrierung mehrerer verschiedenwertiger Münzsorten) sowie Verstärker mit Lautsprechern. Das Gehäuse, welches die genannten Bauelemente aufnimmt, besitzt eine transparente Abdeckhaube. Neben den genannten Bauelementen sind manchmal noch ein Zählwerk für die abgespielten Musikstücke (sog. Popularitätsmesser) und Fernwähler zur Fernbedienung des Automaten zu finden. Die wesentlichen Unterschiede bei den einzelnen Bauarten beziehen sich auf die Konstruktion der Stapelvorrichtung, des Abspielaggregats und der Wählvorrichtung. Aus der Vielzahl der Konstruktionen sei nachfolgend das Arbeitsprinzip der in Abb. 1 dargestellten Ausführung beschrieben.

Nach Durchlaufen des Münzprüfers (s. S. 446), der für die Prüfung von drei verschiedenwertigen Münzsorten eingerichtet ist, fallen die Münzen je nach Wert in den dazugehörigen Münzschacht und betätigen einen Mikroschalter. Dieser gibt einen Impuls an einen ihm zugeordneten Hubmagneten im Münzspeicherwerk, der wiederum durch ein Schrittschaltwerk das sog. Additionszahnrad betätigt. Je nach Münzwert ist die Hublänge des Schrittschaltwerks unterschiedlich: Bei drei verschiedenen Einwurfwerten (z. B. 2 × 10 Pfg für ein Musikstück, 50 Pfg für drei Musikstücke, 1 DM für sechs Musikstücke) wird das Additionszahnrad beim Einwurf von 2 × 10 Pfg um einen Zahn, bei 50 Pfg um drei Zähne, bei 1 DM um sechs Zähne weitergeschaltet. Da das Additionszahnrad so viele Zähne aufweist, wie Musikstücke vorhanden sind, können alle Musikstücke (bei der besprochenen Bauart 60 Stück) durch entsprechenden Geldeinwurf „vorgewählt" werden.

Vom Münzspeicherwerk fließt nun der Strom über einen Kontakt, der zwischen dem Additionszahnrad und einem zweiten Zahnrad (dem sog. Subtraktionszahnrad) angeordnet ist, zu den beiden Tastenverriegelungsmagneten, die im Ruhezustand – solange kein Geld eingeworfen ist – die Betätigung der Wahltasten verhindern. Nach Münzeinwurf wird die Tastatur entriegelt, während gleichzeitig ein Transparent „Bitte wählen" aufleuchtet. Drückt der Benutzer jetzt je eine Buchstaben- und Zahlentaste (die Wahltastatur besteht aus sechs Buchstabentasten A bis F und zehn Zahlentasten 1 bis 9 und 0, so daß 60 Kombinationen möglich sind), so wird zunächst über Mikroschalter auf den Tastenverriegelungsmagneten der Subtraktionshubmagnet erregt, der dadurch das Subtraktionszahnrad um einen Zahn weiterschaltet. Auf diese Weise werden die Additionsschaltschritte bei jedem Musikstück wieder rückgängig gemacht, bis der eingezahlte Betrag verbraucht ist, d. h., bis das Subtraktionsrad das Additionszahnrad eingeholt hat. Jetzt wird durch den Kontakt zwischen den beiden Zahnrädern der Erregerstromkreis der beiden Tastenverriegelungsmagnete wieder unterbrochen, die Tastatur gesperrt, das Transparent „Bitte wählen" erlischt. Gleichzeitig mit dem bisher beschriebenen Vorgang im Münzspeicherwerk läuft ein Impuls von den betätigten Wahltasten in das sog. Vorwählaggregat und wird dort gespeichert.

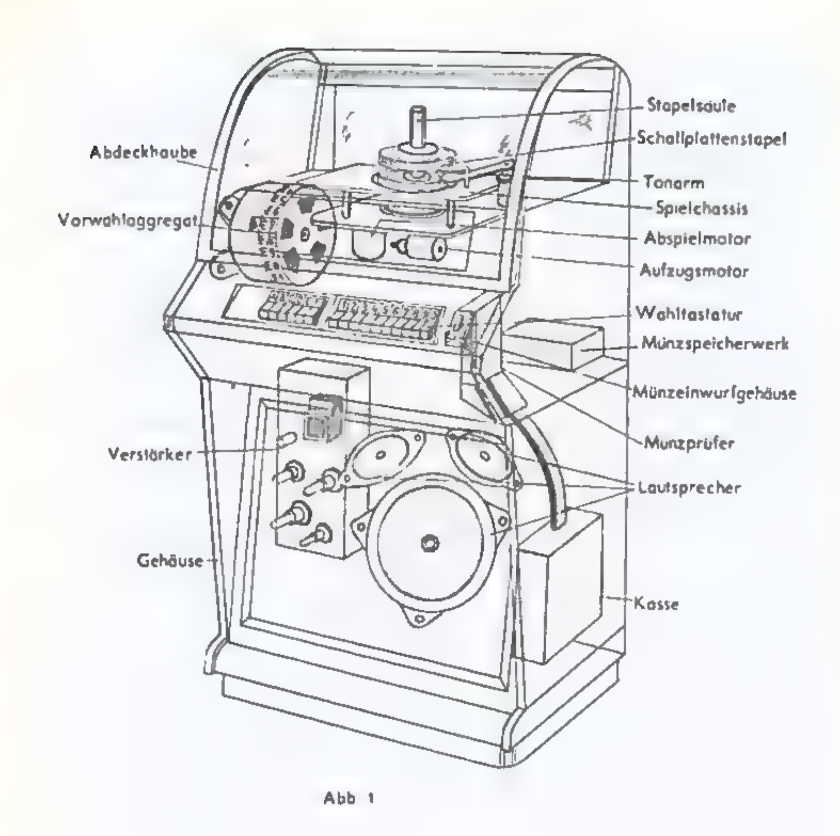


Abb. 1

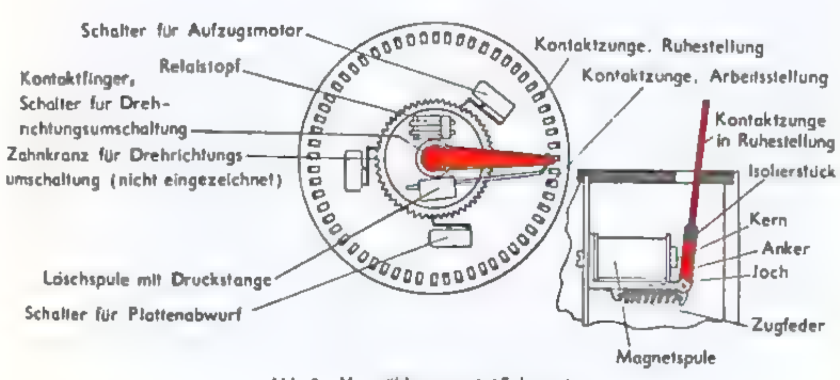


Abb. 2 Vorwählaggregat (Schema)

MUSIKAUTOMATEN II

Das Vorwählaggregat (Abb. 2), das „Gehirn" des Automaten, sorgt dafür, daß der von der jeweiligen Wahltaste ausgehende Impuls auch auf die richtige Schallplatte übertragen wird. Dies geschieht in der Weise, daß ein zu der gewählten Tastenkombination gehörender Elektromagnet (wiederum 60 Elektromagnete im Vorwählaggregat) eine ihm zugeordnete Kontaktzunge („Spielzunge") betätigt (gleichfalls 60 Stück am Umfang des Vorwählaggregats), die zwei Kontakte verbindet und damit den Stromkreis zu dem im Vorwählaggregat befindlichen Wählmotor und zu einer mit ihm parallelgeschalteten Motorbremse schließt.

Der Wählmotor treibt nunmehr einen sogenannten Relaistopf an, der mit einem Kontaktfinger die Kontaktzungen am Umfang des Vorwählaggregats abtastet. Läuft er gegen eine von einem Elektromagneten hervorgezogene Kontaktzunge an, so wird der Stromkreis des Wählmotors unterbrochen. Zugleich wird die Motorbremse stromlos und bringt den Wählmotor sofort zum Stillstand. Bis dahin wird durch einen Mikroschalter, der mit einem Zahnkranz auf dem Umfang des Relaistopfes in Verbindung steht, eine Anzahl von Stromimpulsen erzeugt, die der Anzahl der Zähne auf dem Zahnkranz (identisch mit der Zahl der nicht hervorstehenden Kontaktzungen) entspricht. Diese Stromimpulse werden nun an einen Abwurfmagneten innerhalb der Stapelsäule (Abb. 3) gegeben, der drei Halteknaggen nach innen zieht und gleichzeitig drei Haltezungen herausstößt. Dabei wird also pro Impuls eine Schallplatte abgeworfen, bis die gewählte Kontaktzunge erreicht ist. Damit die abzuspielende Platte immer in der gleichen Abspielebene liegt, sitzen die Platten nicht direkt auf der Stapelsäule, sondern auf dem sog. Stapelträger, der sich entsprechend den abgeworfenen Platten nach unten senkt (Abb. 4).

Da jede Kontaktzunge einem Musikstück entspricht, ist nunmehr die „richtige" Schallplatte erreicht. Ob diese Platte auch noch abgeworfen wird, hängt davon ab, ob die herausstehende Kontaktzunge der Schallplattenober- oder -unterseite entspricht. Im Tastatursystem bezeichnet bei dieser Bauart eine ungerade Zahl die Unterseite, eine gerade Zahl die Oberseite der abzuspielenden Schallplatte. Wird z.B. das Musikstück B1 gewählt, so müßten, beginnend mit der Schallplatte A 1/2, welche im Schallplattenstapel zuunterst liegt, die Schallplatten A 1/2, A3/4, A5/6, A7/8 und A9/0 abgeworfen werden. Da B1 die Unterseite der sechsten Schallplatte ist, wird sie nicht abgeworfen (die Kontaktzunge B1 steht heraus, der Abwurfimpuls kommt nicht mehr durch), sondern der einschwenkende Tonarm, der einen Tonkopf mit zwei Abtastsystemen besitzt, spielt diese Plattenseite von unten ab. Wird dagegen das Musikstück B2 gewählt, also die Oberseite der gleichen Platte, so läuft der Kontaktfinger an der Kontaktzunge B1 vorbei, der dieser entsprechende Zahn auf dem Zahnkranz des Relaistopfes löst einen Impuls des Mikroschalters aus, der Abwurfmagnet wird betätigt, die Schallplatte B1/2 wird abgeworfen. Nun spielt der Tonarm die Oberseite B2 von oben ab.

Das Einschwenken des Tonarms erfolgt mechanisch durch den Abspielmotor, der im Abspielaggregat zwischen zwei Platinen eingebaut ist (Abb. 5) und einerseits die Stapelsäule über den Plattenteller durch Gummirollen antreibt und andererseits auch das Einsteuern, Abheben und Aussteuern des Tonarms übernimmt. Diese unterschiedlichen Bewegungsabläufe werden durch Wechsel der Drehrichtung des Abspielmotors eingeleitet und vollzogen. Der Abspielmotor ist deshalb als Reversiermotor (für Links- und Rechtslauf) ausgelegt. So wird z. B. bei Rechtsdrehung des Plattentellers über eine Zwischenhebelrolle der Tonarm eingeschwenkt und aufgesetzt, während nach dem Abspielen der Motor umgeschaltet wird und bei Linksdrehung des Plattentellers einen Schieber spannt, der den Tonabnehmer abhebt und aussteuert. Gleichzeitig wird durch einen Plattenaufzug, der aus Aufzugsmotor, Kette mit Führung und Aufzugsbügel besteht, der Plattenstapel wieder in die Ausgangsstellung nach oben befördert. Das „Löschen" der Kontaktzungen erfolgt durch eine im Relaistopf eingebaute Löschspule, die durch einen am Spielchassis eingebauten Mikroschalter erregt wird und mit ihrem Anker die jeweilige Kontaktzunge wieder in ihre Ruhestellung zurückdrückt.

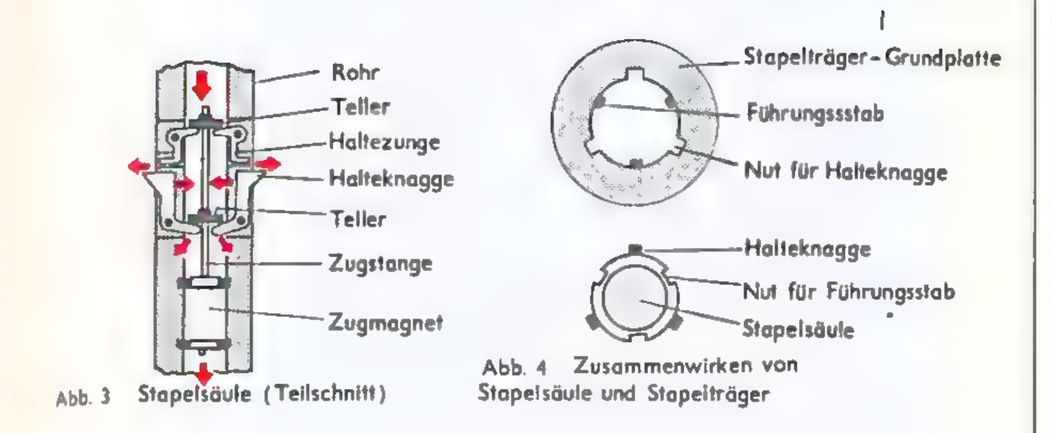


Abb. 3 Stapelsäule (Teilschnitt)

Abb. 4 Zusammenwirken von Stapelsäule und Stapelträger

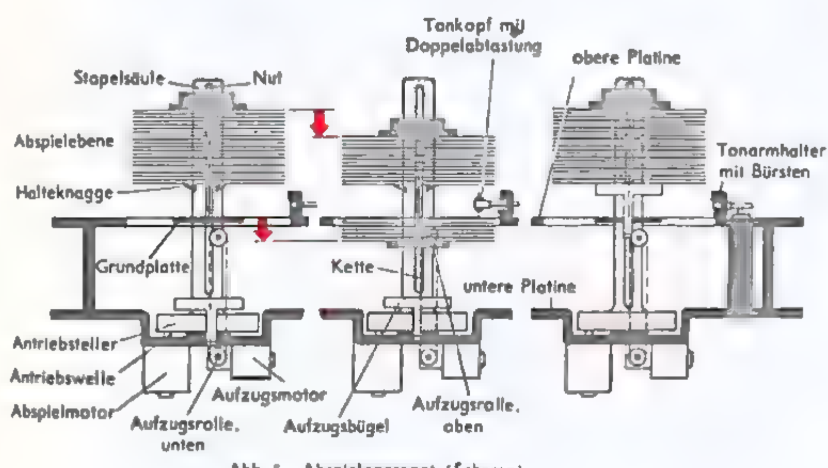


Abb. 5 Abspielaggregat (Schema)

FÜLLHALTER

Beim *Kolbenfüllhalter* ist eine Spindel mit dem Füllgriff verbunden und in die Kolbenstange eingeführt. In die Kolbenstange sind Spindelgänge gearbeitet, in denen sich die Spindel drehend bewegt. Am vorderen Ende der Kolbenstange ist der Kolbenkopf aufgesetzt, der den Tintenraum nach hinten tinten- und luftdicht abschließt. Die Kolbenstange wird durch einen Führungssteg in der Kolbenführung, die fest in den Schaft eingepreßt ist, geleitet, so daß die Drehbewegung von Füllgriff und Spindel in eine Vor- und Rückwärtsbewegung der Kolbenstange gewandelt wird (Abb. 1a). Der Kolben ist durch Linksdrehen (Abb. 1b) des Füllgriffs vorgeschraubt. Eine Abflachung im Gewinde der Kolbenführung ermöglicht den Eintritt von Luft in die Mechanik hinter den Kolben, um eine Sogbildung zu vermeiden. Beim Zurückführen des Kolbens entweicht die Luft auf dem gleichen Wege. Der Kolben wird durch Rechtsdrehen (Abb. 1c) des Füllgriffs zurückgeschraubt. Es entsteht eine Sogwirkung vor dem Kolben im Tintenbehälter und in den Tintenleitwegen des Zuführers bis zur Höhe des Luftlochs in der Feder. Die Feder muß beim Füllen bis über das Luftloch in die Tinte getaucht werden, damit der Füllhalter gefüllt werden kann.

Die Tinte wird beim Schreiben aus dem Tintenbehälter durch Kapillarrillen im Zuführer bis zur Federunterseite weitergeführt und von dort im Federschlitz zur Federspitze geleitet. Beim Schreibdruck spreizen sich die elastischen Federschenkel, der Federschlitz wird breiter und nimmt entsprechend mehr Tinte auf, so daß auch mehr Tinte an das Papier abgegeben wird. – Im gleichen Maße, in dem Tinte verbraucht wird, muß Luft in den Tintenbehälter einströmen. In den Zuführer ist dazu ein Luftweg eingefräst, der die Luft in kleinsten Bläschen zum Tintenraum leitet (Abb. 1d).

Die Tintenpatrone des *Patronenfüllhalters* (Abb. 2) ist aus flexiblem Kunststoff gefertigt und mit einer Glaskugel verschlossen. Der Patroneninhalt beträgt 1 cm^3. Beim Einsetzen in den Füllhalter wird die Kugel von einem Dorn in die Patrone zurückgestoßen; sie verbleibt dort, ohne den Tintenfluß zu beeinträchtigen. Aufgabe des Zuführers ist es, die Tinte von der Patrone bis zur Feder zu leiten (Abb. 2b). Am Ende des Zuführers befindet sich eine geschliffene Zunge, die die Tinte aus der Patrone herauszieht. Außerdem ist der Zuführer so gearbeitet, daß Luft in die Patrone eintreten kann. Eine Dichtungsglocke schirmt die Patronenmündung nach den Seiten ab, um ein unbeabsichtigtes Zurückfließen der Tinte in den Schaft zu verhindern.

Der *thermic-Regler* besteht aus zwei ineinandergesteckten Hülsen, die im Zuführer liegen. Die Zwischenräume sind so berechnet, daß sich die Tinte durch Kapillarkraft an den Hülsenwänden hält. Die hier auftretenden Kräfte werden stets an der Grenze fester und flüssiger Stoffe wirksam. Auf die Moleküle der Flüssigkeit, die sich an der Grenzfläche befinden, wirken sowohl Anziehungskräfte der Moleküle aus dem Innern der Flüssigkeit als auch Anziehungskräfte der Moleküle der festen Wand. Bei der Tinte überwiegen die Kräfte zwischen Flüssigkeit und Wand, die Tinte „haftet" so an den Wänden der Kapillaren. Sie kann sich daher selbst gegen die Schwerkraft in hinreichend dünnen Röhrchen halten. Zweck dieses Systems ist es, die überschüssige Tinte aufzunehmen, die durch Erwärmung oder geringen Außenluftdruck (Ausdehnung der Luft in der Patrone) zur Feder drückt und zum Klecksen führen würde. Die Ausgleichskammern (Zwischenräume) bieten durch die volle Wirksamkeit der Kapillarkraft und durch ihre große Aufnahmefähigkeit größtmögliche Klecks- und Höhensicherheit.

Abb. 1 Kolbenfüllhalter

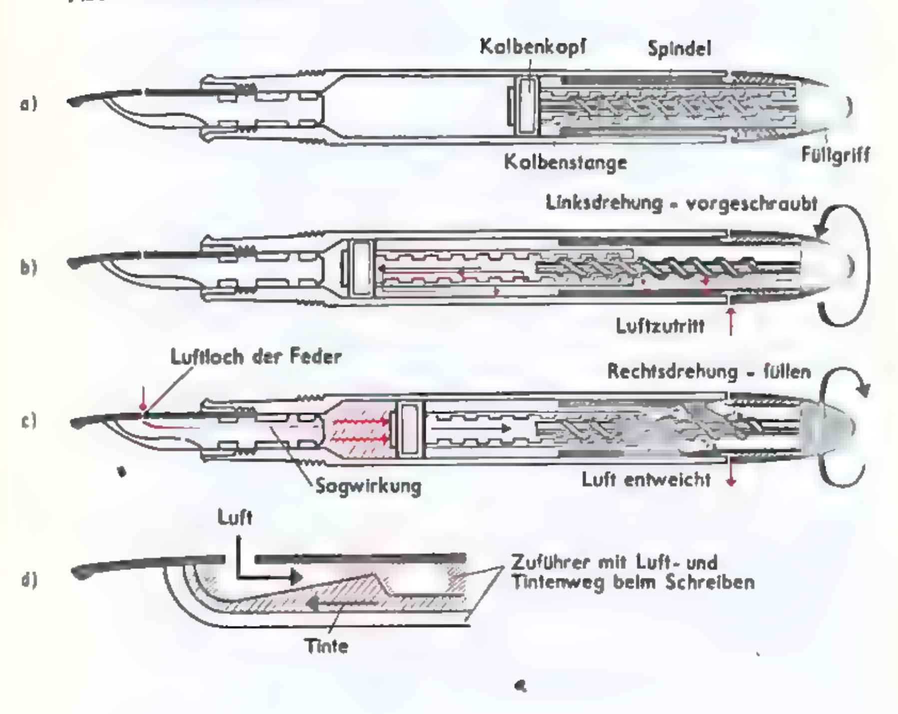
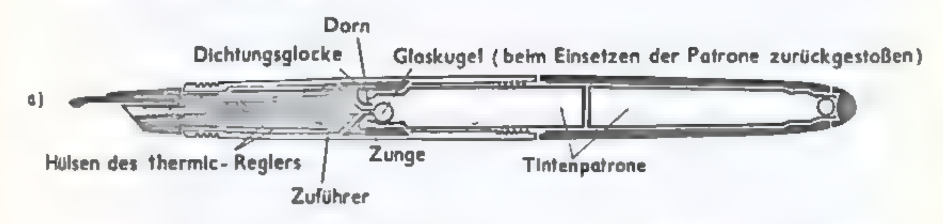
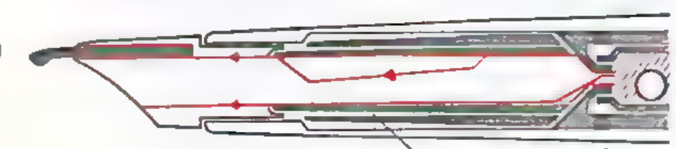


Abb. 2 Patronenfüllhalter





KUGELSCHREIBER

Ein Kugelschreiber ist ein Schreibgerät, bei dem eine kleine rollende Kugel in der Minenspitze eine Farbmasse auf das Schreibpapier überträgt. Die Kugel wird durch die Farbmasse geschmiert, die sich in der Mine hauptsächlich durch Einwirkungen der Schwerkraft bewegt. Die stillstehende Kugel verschließt, wenn sie genau sitzt, die Farbmine und verhindert dadurch deren Austrocknen. Die Farbmasse besteht im allgemeinen aus an Olein gebundenen Fettfarbstoffen (Farbanteil rd. 10–20%). Neben den einfachen Kugelschreibern mit nicht versenkbarer Mine gibt es Druckkugelschreiber, bei denen die Mine durch mechanische Vorrichtungen in die Schreibstellung bzw. zurück in den Kugelschreiber geführt werden kann. Für die Minenbetätigung gibt es zahlreiche Varianten. Bei einem Druckkugelschreiber mit *Securit-Mechanik* (Abb. 1) wird mit dem von Hand betätigten Druckknopf das Druckrohr mit der darin sitzenden Mine vorgeschoben. Die Führungen des Druckrohres sind dabei vollständig in die im Schaftoberteil feststehenden Steuerschlitze eingeführt (Abb. 2a). Bei der Entlastung des Druckknopfes geht die Mine durch die Wirkung der großen Feder wieder zurück. Dabei rasten die Führungen des mit der Mine verbundenen Druckrohres in die kleinen Verzahnungen der Schalthülse ein. Die Mine befindet sich dann in Schreibstellung (Abb. 2b). Die Lösung der Schreibstellung erfolgt wieder durch Niederdrücken des Druckknopfes. Dabei tauchen die Führungen des Druckrohres in die feststehenden Steuerschlitze ein (Abb. 2c). Die durch eine kleine Feder belegte Schalthülse setzt sich auf die Schrägspitzen der feststehenden Steuerschlitze, wobei sich die Schalthülse um einen Zahn weiterdreht.
Beim Zurückgehen des Druckrohres wird zunächst die Schalthülse angehoben und dabei gedreht. Danach können die Führungen des Druckrohres in die großen Zahnöffnungen der Schalthülse eintauchen, wodurch die Mine in das Schreibgerät zurückgeführt ist (Abb. 2d). Das Steuerglied ist dabei wiederum die Schalthülse, die bei jeder Betätigung des Druckknopfes eine kleine Drehbewegung ausführt.
Druckkugelschreiber mit *Kugelmechanik* sind gegenüber dem oben beschriebenen System viel einfacher gebaut, zudem ist die Kugelmechanik praktisch verschleißfest, da sie weniger Einzelteile und weder Schaltzähne noch Nocken hat. Sie wird durch den verlängerten Druckknopf, durch Schaftober- und -unterteil sowie durch eine kleine Stahlkugel gebildet (Abb. 3 u. 4a). Beim Betätigen des Druckknopfes rollt die Stahlkugel im Uhrzeigersinn in einer herzförmigen Aussparung des verlängerten Druckknopfes (Abb. 4b). Sie wird dabei nach außen durch das Schaftoberteil, nach unten durch das eingeschraubte Unterteil und nach oben durch einen Ansatz im Oberteil in gleicher Höhe gehalten. Durch ihre Lage innerhalb der herzförmigen Leitkurve wird der Stand der Mine bestimmt (Abb. 4c). Nach dem Druck auf den Knopf befindet sich die Kugel im oberen Rastpunkt der Herzkurve. Hier wird sie durch den Druck der Mechanikfeder gehalten; die Mine ist in Schreibstellung. Nach nochmaligem Druck auf den Knopf liegt die Kugel im unteren Rastpunkt, die Mine gleitet in den Kugelschreiber zurück.

Abb. 1 Druckkugelschreiber mit Securit-Mechanik

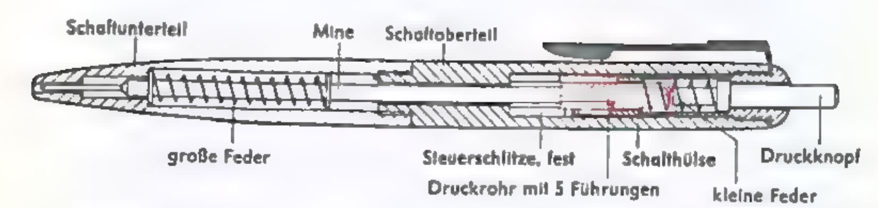


Abb. 2 Funktionsweise der Securit-Mechanik

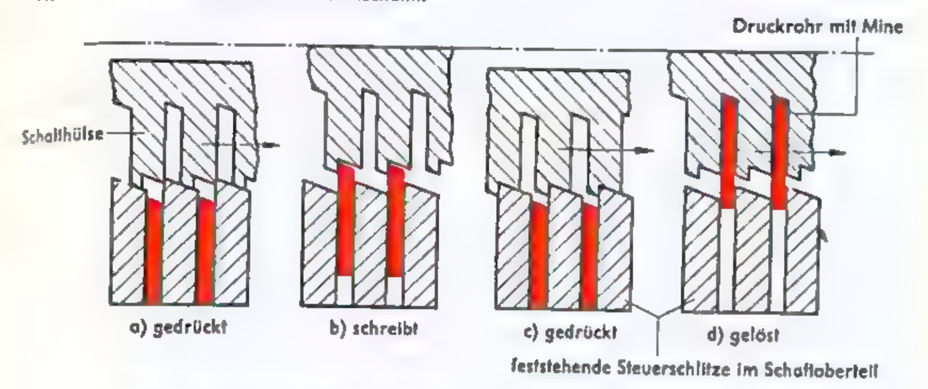


Abb. 3 Druckkugelschreiber mit Kugelmechanik

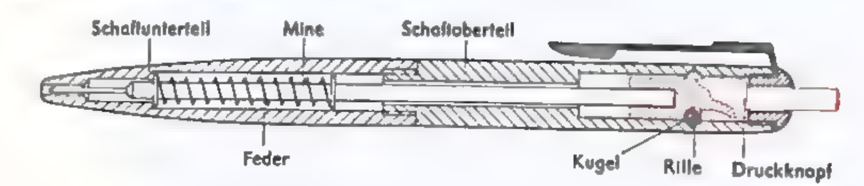
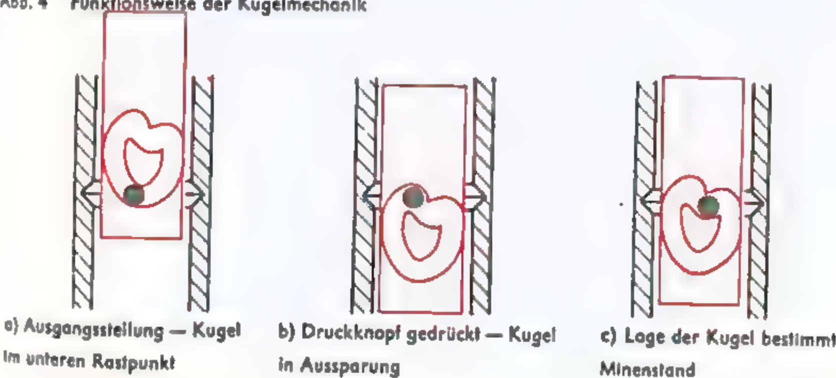


Abb. 4 Funktionsweise der Kugelmechanik



REISSVERSCHLUSS

Die beiden Hauptbestandteile eines Reißverschlusses sind die Zahnketten, die an einem Streifen aus Stoff befestigt sind, und der Schieber, der den Öffnungs- bzw. Schließvorgang besorgt.

Die Zahnkette besteht meist aus Metallzähnen, die auf ihrer Oberseite kleine buckelartige Erhöhungen und auf ihrer Unterseite entsprechend geformte Vertiefungen tragen (Abb. 1). Der Buckel des unteren Zahnes paßt dabei genau in die Vertiefung des darüberliegenden Zahnes. Die beiden Zahnketten, die in geöffnetem Zustand einander gegenüberliegen, sind gegeneinander versetzt. Um den Verschluß zu schließen, müssen nur die beiden Zahnketten so aufeinander zugeführt werden, daß sich jeweils die beiden gegenüberliegenden Zähne ineinander verzahnen können. Diese Arbeit besorgt der Schieber, der oben durch ein keilförmiges Metallstück in zwei auseinanderlaufende Kanäle geteilt ist; diese Kanäle werden im unteren Teil des Schiebers zusammengeführt. Die Ausbildung des Schiebers führt die beiden Zahnketten genau in dem Winkel aufeinander zu, der notwendig ist, um die buckelartigen Erhöhungen in die Vertiefungen des gegenüberliegenden Zahnes zu schieben (Abb. 2). An beiden Enden des Reißverschlusses sind Endstücke angebracht, die ein Herausrutschen des Schiebers verhindern. Bei teilbaren Verschlüssen ist das untere Endstück so ausgebildet, daß eine Zahnkette aus dem Schieber herausgleiten kann, während die andere Zahnkette den Schieber festhält.

Bei anderen Ausführungsformen von Reißverschlüssen sind die Schließketten aus Kunststoffen (z. B. Perlon) hergestellt. Daraus ergibt sich eine von der Bauart des Metallzahnes abweichende Form. Die Schließketten bestehen hier nicht mehr aus einzelnen Zähnen, sondern aus Schlaufen, die durch eine spiralige Wicklung entstanden sind (Abb. 3). Verschlüsse dieser Art haben den Vorteil, daß sie aufgrund der elastischen Eigenschaften des Kunststoffes durch Reißen nicht zu zerstören sind. Neben diesen beschriebenen Ausführungen gibt es eine Reihe anderer, die jedoch alle nach dem geschilderten Prinzip arbeiten und sich nur durch die unterschiedliche Prägung der Zähne voneinander unterscheiden.

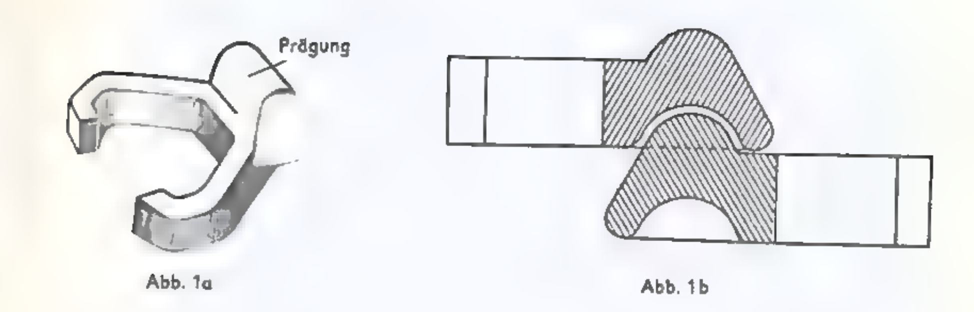


Abb. 1a

Abb. 1b

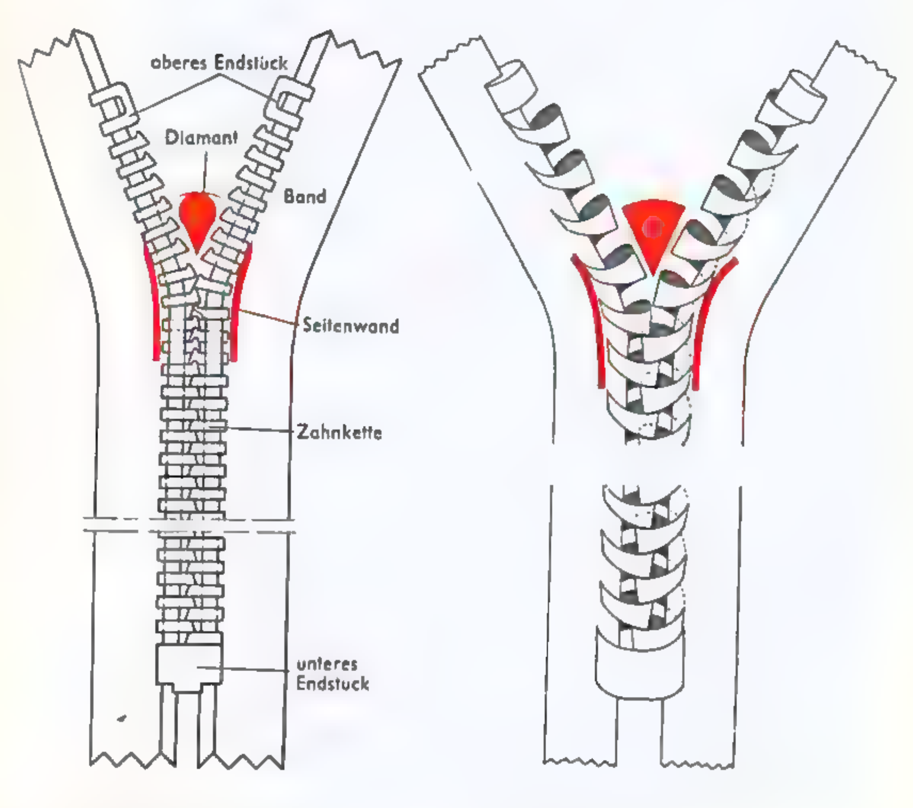


Abb. 2
Reißverschluß mit Metallschließketten

Abb. 3
Reißverschluß mit Kunststoffschließketten

Vor dem Anlassen des Motors ist der Schalthebel (Abb. 3) in Leerlaufstellung zu bringen, damit die kraftschlüssige Verbindung zwischen Motor und Antriebsachse unterbrochen ist. Dabei muß die Handbremse ausreichend fest angezogen sein, um das Fahrzeug am Fortrollen zu hindern. Nun kann der Zündschlüssel in den Zündanlaßschalter eingeschoben werden (Abb. 2). Durch Drehen des Schlüssels im Uhrzeigersinn (nach rechts) wird auf Stellung „Garage" die Lenkungssperre entriegelt und die Lenkung frei bewegbar. In dieser Stellung des Zündschlüssels kann der Wagen verschoben oder abgeschleppt werden, ohne daß der Motor läuft. Durch weiteres Drehen des Schlüssels nach rechts auf Stellung „Fahrt", wird die Zündung eingeschaltet. Ist gerade der Unterbrecher der Batteriezündanlage geschlossen, fließt durch die Primärwicklung der Zündspule Strom. Das Ladekontroll- und Öldruckkontrollicht leuchtet im Kombinationsinstrument (Abb. 1) auf. Dreht man den Schlüssel entgegen dem Federdruck noch weiter nach rechts auf Stellung „Start", so erhält der Anlasser Strom. Der Motor wird fremd angetrieben. Ist der Motor angesprungen, muß der Schlüssel sofort losgelassen werden, damit er in Stellung „Fahrt" zurückfedern kann. Der Anlasser würde andernfalls vom Motor mit unzulässig hoher Drehzahl angetrieben und schnell Schaden erleiden.
Läuft der Motor, so erlischt bei erhöhter Leerlaufdrehzahl die Ladekontrollund Öldruckkontrolleuchte. Der Kaltstartknopf ist so früh wie möglich wieder einzudrücken, da ein fettes Gemisch sehr viel Benzin enthält, das den an der Zylinderwandung anhaftenden Ölfilm abwäscht. Dadurch fehlt die für den Kolben notwendige Schmierung.
Springt der Motor nicht an, muß der Schlüssel wegen der eingebauten Anlaßwiederholsperre zur erneuten Betätigung des Anlassers zunächst auf Stellung „Garage" gebracht und dann wieder auf „Start" gedreht werden. Diese Einrichtung verhindert das Einschalten des Anlassers bei laufendem Motor, da in der Stellung „Garage" die Zündung abgestellt wird und der Motor zum Stillstand kommt.
Durch Niedertreten des Kupplungsfußhebels (Abb. 1) löst die Kupplung die kraftschlüssige Verbindung zwischen Motor und Getriebe. Zum Anfahren muß nun mit dem Gangschalthebel der erste Gang im Getriebe eingelegt werden (Abb. 3).
Nach Lösen des Handbremshebels und nach vorsichtigem Einkuppeln, wobei man den Kupplungsfußhebel bei gleichzeitigem Gasgeben langsam zurückkommen läßt, fährt der Wagen an. Mit dem Gasfußhebel ist die Drosselklappe des Vergasers verbunden. Durch allmähliches Niederdrücken des Gasfußhebels (Gaspedal) gibt die Drosselklappe immer größeren Luftmengen Einlaß in den Vergaser und damit in den Motor. Die Drehzahl des Motors nimmt zu, der Wagen beschleunigt.
Die Gelenkwelle (Kardanwelle) verbindet das Getriebe mit dem Hinterachsgetriebe. Der Motor und das damit verschraubte Getriebe ist an drei Punkten elastisch in Gummi gelagert und kann Pendelbewegungen ausführen. Das Hinterachsgetriebe (Differential) ist entweder elastisch über Gummipuffer mit dem Wagenkörper verbunden oder führt bei der Starrachse die Federbewegungen beider Antriebsräder aus. In beiden Fällen verändert sich der Abstand zwischen Getriebe und Hinterachstrieb sowie deren gegenseitige Höhenlage. Ein kraftschlüssiges Schiebestück in der Kardanwelle läßt die Längenveränderung zu. Um Schwingungen und lästige Geräuschentwicklung zu vermeiden, werden lange Gelenkwellen unterteilt und zwischengelagert. Bei der Frontantrieb- oder Heckmotoranordnung sind Motor, Getriebe und Ausgleichgetriebe zu einem Antriebsblock zusammengebaut, Abb. 4, so daß die Kardanwelle entfällt.

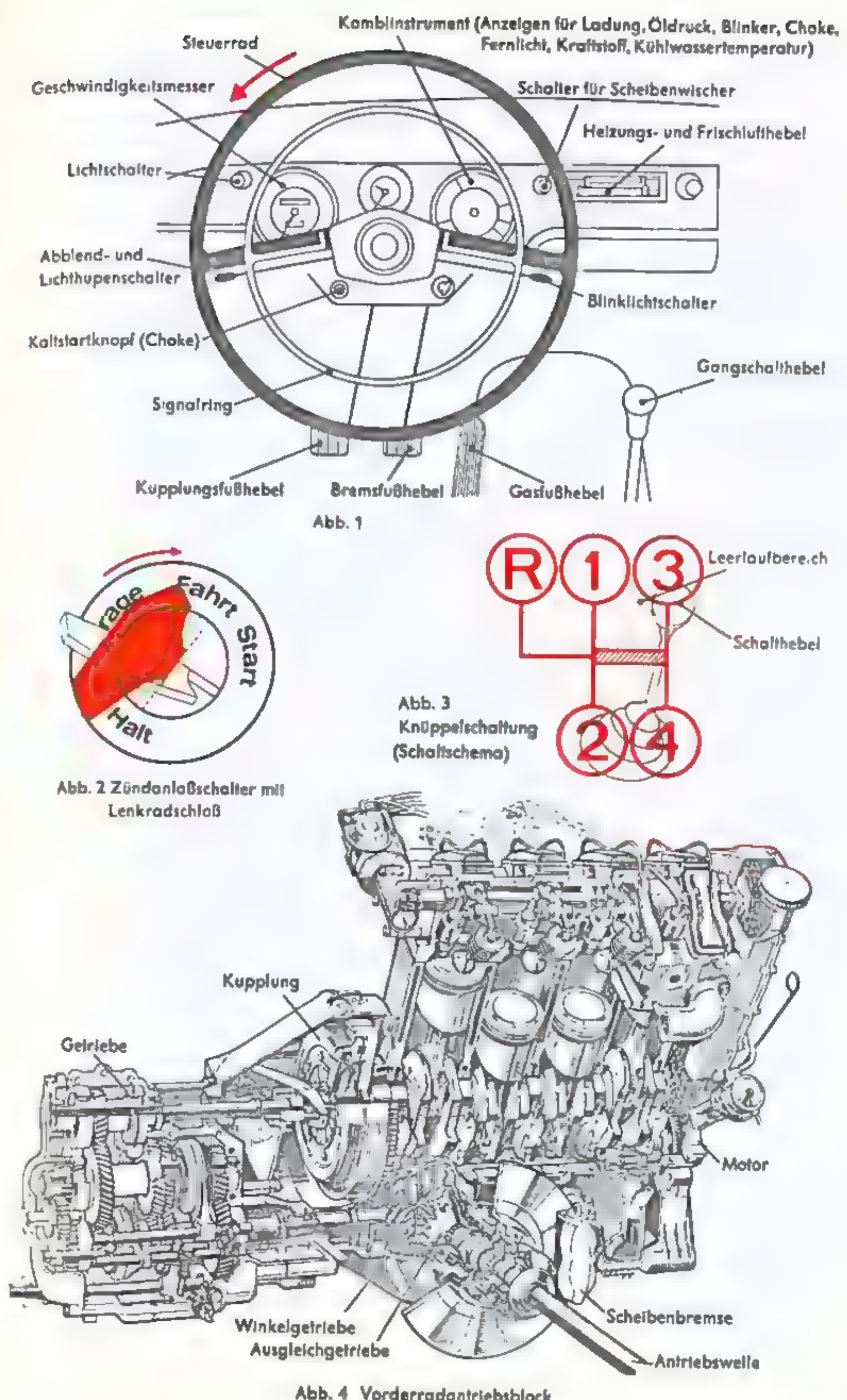


Abb. 1

Abb. 2 Zündanlaßschalter mit Lenkradschloß

Abb. 3 Knüppelschaltung (Schaltschema)

Abb. 4 Vorderradantriebsblock

PERSONENWAGEN II

Bei der in Abb. 5 gezeigten Anordnung sind die Antriebsräder der Hinterachse über je eine Doppelgelenkwelle kraftschlüssig mit dem Hinterachsgetriebe verbunden. Die Radführung übernehmen in Gummi gelagerte, schräggestellte Längslenker. Diese sind drehbar am Hinterachsfahrschemel befestigt. Beim Einfedern eines Rades verändert sich der Abstand von Hinterachsgetriebe zum Rad. Die Doppelgelenkwelle besitzt daher ein kraftschlüssiges Schiebestück, das die Längenänderung ermöglicht. Da die beschriebene Bauweise (Abb. 1) sehr aufwendig ist, findet häufig der billigere starre Hinterachsantrieb Anwendung (Abb. 6). Dabei befinden sich das Winkel- und Ausgleichsgetriebe und die beiden Seitenwellen sowie die zugehörigen Lager in einem starren Gehäuse, das z. B. aus Stahlblech gepreßt ist. Die Führung der Achse übernehmen zwei in Längsrichtung des Fahrzeuges angeordnete Längslenker.

Durchfährt das Fahrzeug eine Bodenunebenheit, dann schwingt die Federung infolge ihrer geringen inneren Reibung nur langsam aus. Stoßdämpfer müssen daher die Schwingung durch ihre Dämpfwirkung unterdrücken. Die Schwingungsenergie wird in Wärmeenergie umgewandelt (s. Stoßdämpfer, S. 484).

Die Vorderachse des in Abb. 5 dargestellten Fahrzeuges setzt sich aus einem unteren Querlenker (Abb. 7 a), der die Seiten- und Querkräfte ableitet und aus einem McPherson-Federbein (Abb. 7 b) zusammen. Dieses Federbein besteht im wesentlichen aus einem Zweirohr-Teleskopstoßdämpfer. An dessen Außenrohr sind unten der Achskörper und die dreh- und schwenkbare Lagerung für den Querlenker und oben die Auflagerung für die Schraubenfederung befestigt. Die Kolbenstange ragt durch die Schraubenfeder hindurch und ist mit dem Wagenkörper verbunden (Abb. 7 b). Diese Anordnung hat im Personenwagenbau weite Verbreitung gefunden.

Durch Drehen des Lenkrades nach links wird über die Lenksäule das Lenkgetriebe (s. S. 486 ff.) betätigt. Dabei schwenkt der Lenkhebel (Abb. 7 a) nach innen. Die Spurstange verbindet den Lenkhebel des Lenkgetriebes mit dem Lenkhebel der Achse. Dadurch dreht sich das Außenrohr des Federbeines mit dem daran angebrachten Vorderrad so, daß sich die rot eingezeichnete Radstellung ergibt: Der Wagen beschreibt einen Linksbogen. Wird das Lenkrad nach rechts gedreht, so schlagen beide Vorderräder entsprechend nach rechts ein: Der Wagen fährt einen Bogen in dieser Richtung.

Den Wechsel der Fahrtrichtung zeigt man mittels des Blinklichtschalters an (Abb. 1, S. 462). Dabei erscheint am Wagenbug und Wagenheck ein Blinklicht auf der Seite des Fahrzeugs, die mit dem Blinklichtschalter gewählt wurde. Zum Abbremsen des Fahrzeugs dient die Fußbremse. Die Betätigung erfolgt durch Niedertreten des Bremsfußhebels (Abb. 1, S. 462). Die Stärke der Abbremsung ergibt sich aus der Kraft, mit der der Bremsfußhebel niedergedrückt wird. Die Bremsen (s. S. 492 ff.) werden hydraulisch betätigt. Ein Bremskraftverstärker setzt die erforderliche Pedalkraft herab. Damit bei Undichtheit im hydraulischen System nicht die gesamte Bremskraft ausfällt, wird häufig die Bremsanlage in zwei unabhängig voneinander arbeitende Kreise (Zweikreisbremse) aufgeteilt. Ein Bremskraftverteiler bewirkt, daß beim Bremsen die stärker belasteten Vorderräder mit einer größeren Bremskraft als die teilweise entlasteten Hinterräder abgebremst werden. Häufig sind die beiden Vorderräder mit Scheibenbremsen, die Hinterräder mit Trommelbremsen ausgerüstet.

Zum Sichern eines abgestellten Fahrzeuges vor dem Fortrollen dient die Handbremse. Der Handbremshebel wirkt über Seilzüge auf die Bremsbacken der hinteren Trommelbremsen. Bei Betätigung werden die Bremsbacken an die Bremstrommel gepreßt.

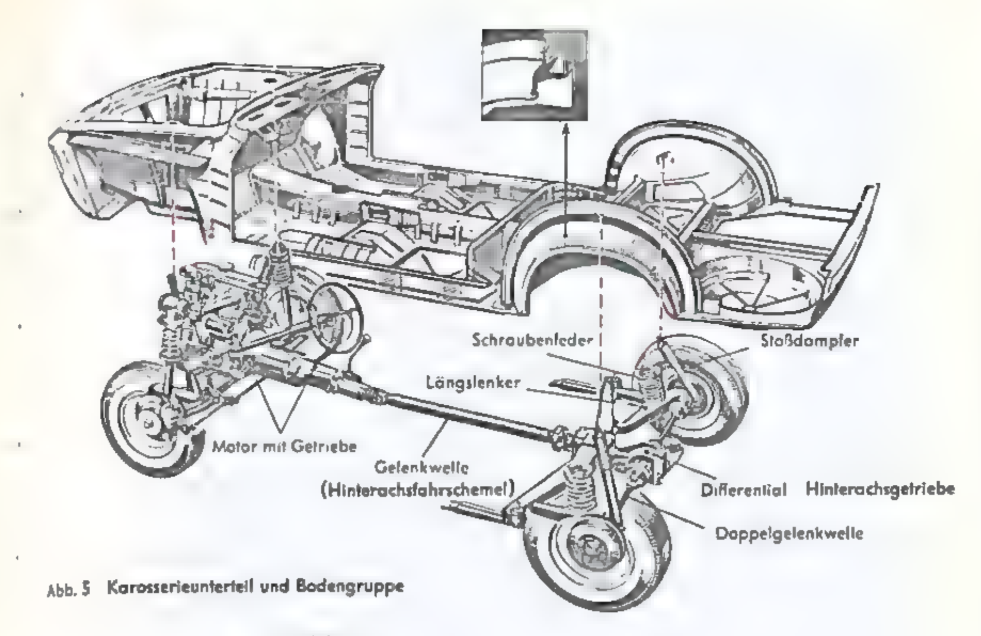


Abb. 5 Karosserieunterteil und Bodengruppe

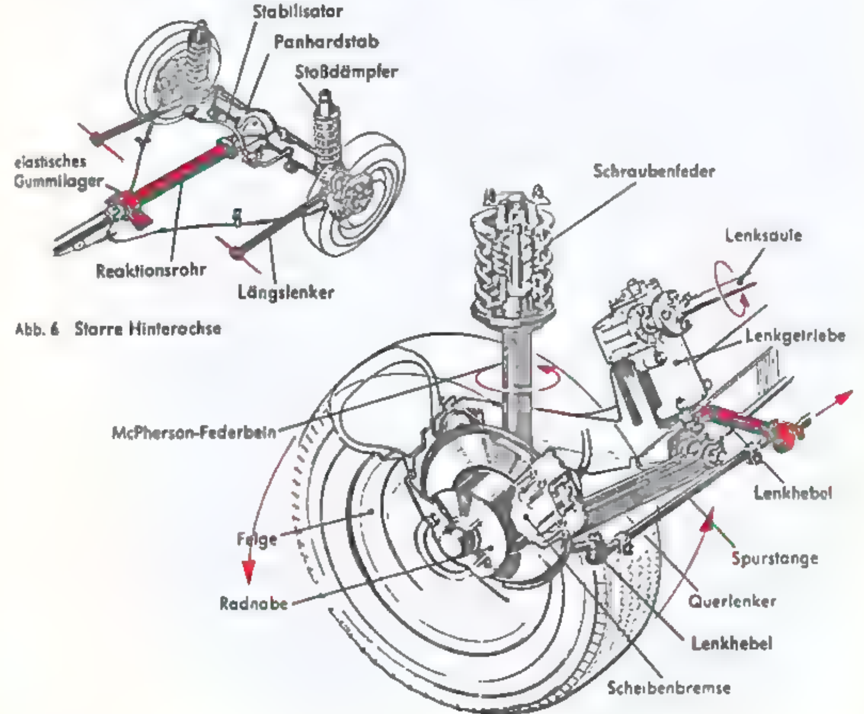


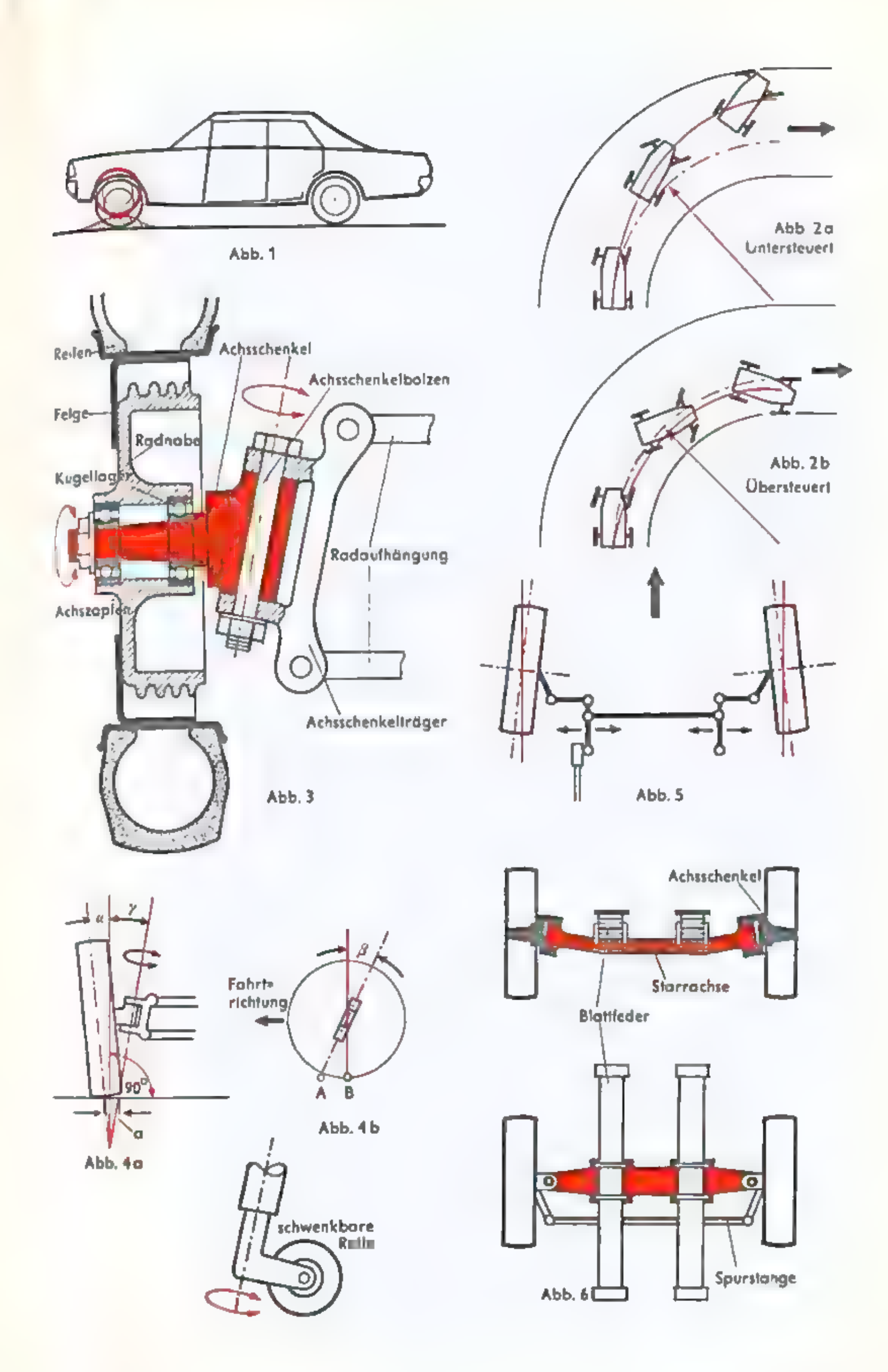
Abb. 6 Starre Hinterachse

Abb. 7 Vorderachse

FAHRWERK I (VORDERACHSEN)

Die Radaufhängung verbindet die Räder von Kraftfahrzeugen beweglich mit dem Fahrgestell oder mit der selbsttragenden Karosserie. Dabei stützt sich jedes Rad einzeln über ein Federelement an dem Fahrzeug ab. Dadurch können die Räder der unebenen Fahrbahn ohne Abheben folgen, indem sie gegenüber dem Fahrzeugkörper hauptsächlich eine senkrechte Bewegung ausführen (Abb. 1). Je nach Ausführung der Radaufhängung und des Federungssystems werden Fahrbahnstöße mehr oder weniger gedämpft an das Fahrzeug weitergegeben. Die Geradeauslaufeigenschaft sowie das Verhalten eines Fahrzeuges bei der Änderung der Fahrtrichtung (z. B. bei Kurvenfahrt die Straßenlage) wird im wesentlichen von der Ausführung der Radaufhängung und der Federung bestimmt. Beim Durchfahren einer Kurve soll sich das Fahrzeug auch bei höherer Geschwindigkeit auf einer Linie bewegen, die dem Kurvenradius entspricht, es soll also ein neutrales Lenkverhalten zeigen. Untersteuert der Wagen, so strebt das Fahrzeug trotz eingelenkter Vorderräder dem äußeren Kurvenrand zu (Abb. 2a). Das Lenkrad und damit die Vorderräder müssen stärker in die Kurve gedreht werden als es der Radius der Kurve erfordert. Ein übersteuerndes Fahrzeug dreht dagegen durch Wegrutschen der Hinterräder in die Kurve hinein. Dem muß durch Zurückdrehen des Steuerrades – Gegenlenken – und damit durch Abdrehen der Vorderräder von der Kurve begegnet werden (Abb. 2b).

Die beiden Vorderräder mit ihren Radaufhängungen und Federsystemen bilden die Vorderachse, die Hinterräder mit den entsprechenden Bauelementen ergeben die Hinterachse eines Wagens. Die Radaufhängung der Vorderachse muß neben der senkrechten Bewegung zum Ein- und Ausfedern auch eine Schwenkbewegung der beiden Räder zum Lenken des Fahrzeuges zulassen (s. S. 486ff.). Die Schwenkbewegung des Rades wird durch den Achsschenkel ermöglicht (Abb. 3). Der Achsschenkel ist schwenkbar um den Achsschenkelbolzen angeordnet und durch diesen mit dem Achsschenkelträger und mit der Radaufhängung verbunden. Das Rad ist mit Kugellagern drehbar auf dem Achszapfen des Achsschenkels befestigt. Der zum Lenken eines Fahrzeuges erforderliche Kraftaufwand soll möglichst gering sein. Fahrbahnstöße dürfen nicht auf das Lenkrad übertragen werden. Außerdem müssen sich die Räder nach dem Einlenken selbsttätig wieder in die Geradeausfahrt einstellen. Aus diesem Grunde schwenken die gelenkten Räder um einen in zwei Ebenen geneigt angeordneten Achsschenkelbolzen; außerdem ist die Radebene etwas aus der Senkrechten geneigt. Diese Neigung zur Senkrechten, der Winkel α in Abb. 4a, wird Sturz genannt. Die Neigung des Achsschenkelbolzens zur Senkrechten, der Winkel γ (als Spreizung bezeichnet), ergibt mit dem Sturz des Rades einen kleinen Rollradius a (Abb. 4a). Das ist der Radius der Kreisbahn, den das Rad beim Schwenken um den Achsschenkelbolzen auf der Fahrbahn beschreibt. Gleichzeitig aber ist a der Hebelarm, mit dem die Fahrbahnkräfte beim Überfahren einer Unebenheit auf die Lenkung wirken. Der Rollradius soll klein sein, darf aber nicht Null werden, denn bei stillstehendem oder langsam fahrendem Wagen würde die Lenkung zu schwer gehen, da das Rad nicht mehr auf einer Kreisbahn abrollt, sondern auf der Stelle verdreht wird. Der Achsschenkelbolzen weist außerdem eine Neigung in Fahrtrichtung um den Winkel β auf (Abb. 4b). Durch diesen Nachlauf liegt der Reifenaufstandspunkt B hinter dem Punkt A. Dies ist der Schnittpunkt der verlängerten Mittellinie des Achsschenkelbolzens mit der Fahrbahn. Dadurch wird das nachlaufende Vorderrad wie die schwenkbare Rolle eines Teewagens gezogen und stellt sich von selbst in die gerade Fahrtrichtung ein. Spreizung und Nachlauf bewirken die selbsttätige Geradestellung der Vorderräder nach einer Kurvenfahrt.



FAHRWERK II (VORDERACHSE)

Die Räder der Vorderachse eines Fahrzeuges stehen bei Geradeausfahrt nicht parallel, sondern sind in Fahrtrichtung etwas nach innen gedreht (Abb. 5). Diese Vorspur spannt die Reifen und das Lenkgestänge vor, da sich die Räder parallel zur Fahrtrichtung einstellen wollen. Dadurch wird die Seitenführung des Reifens verbessert (vgl. S. 486 ff.) und die durch das Spiel im Lenksystem verursachte Flatterneigung der Räder vermindert.
Die Radaufhängung schnellfahrender Fahrzeuge soll beim Ein- und Ausfedern des Wagenkörpers eine möglichst geringe Spur-, Vorspur- und Sturzänderung sowie einen nur kleinen Versatz der Radmitte zur Folge haben. Damit das Rad möglichst trägheitsfrei den Fahrbahnunebenheiten folgen kann, ist eine möglichst geringe Masse des Rades und der Radaufhängung anzustreben.
Die starre Vorderachse wird bei Personenwagen wegen der großen ungefederten Masse und wegen der zwangsweisen Sturzänderung beider Vorderräder bei einseitigem Heben oder Senken eines Rades nicht mehr verwendet. Jedoch ist die Starrachse (Abb. 6) die meist verwendete Vorderachsbauweise für Lastwagen und Omnibusse. Zwei halbelliptische Blattfedern (Abb. 7) verbinden die Starrachse mit dem Rahmen des Fahrzeuges. Die Blattfedern stützen die Achse außerdem gegen die Fahr- und Bremsmomente ab.
Als Radaufhängung der gelenkten Vorderräder von Personenwagen hat sich die Doppelquerlenkerkonstruktion allgemein verbreitet. Prinzipiell sind bei dieser Bauart zwei Hebel von dreieckförmiger Gestalt übereinander angeordnet (Abb. 8). Diese Dreieckslenker sind drehbar mit der Karosserie oder mit dem Fahrgestell verbunden. Als Lager dienen meist Gummielemente, die keinerlei Wartung erfordern. An der Spitze der beiden Dreieckslenker ist dreh- und schwenkbar der Achsschenkel angeschlossen. Die gelenkige Lagerung des Achsschenkels in den beiden Dreieckslenkern wird häufig durch die Verwendung von Kugelbolzen erreicht, die in wartungsfreien Kunststoffkugelschalen gelagert sind. Bei der einfachsten Querlenkerachse bildet die quer zur Fahrtrichtung gestellte, halbelliptische Blattfeder den unteren Querlenker (Abb. 9). Der obere Querlenker ist als Dreieck ausgebildet und durch den Achsschenkelträger beweglich mit der Blattfeder verbunden. Im Achsschenkelträger ist der Achsschenkel schwenkbar befestigt. Die weitaus am häufigsten angewandte Querlenkerbauart besitzt zwei übereinander angeordnete Dreieckslenker (Abb. 10). Als Federelement dient eine Schraubenfeder, die sich einerseits auf dem unteren Dreieckslenker, andererseits auf dem Achsschenkel abstützt. Die beiden Dreieckslenker sind Blechformteile unterschiedlicher Länge, wodurch die Spur- und Sturzänderung des Rades beim Einfedern gering gehalten werden kann. Die Dreieckslenker übertragen die Fahr- und Bremsreaktionskräfte auf den Fahrzeugkörper. Zwei Kugelbolzen verbinden den Achsschenkel dreh- und schwenkbar mit den beiden Dreieckslenkern.

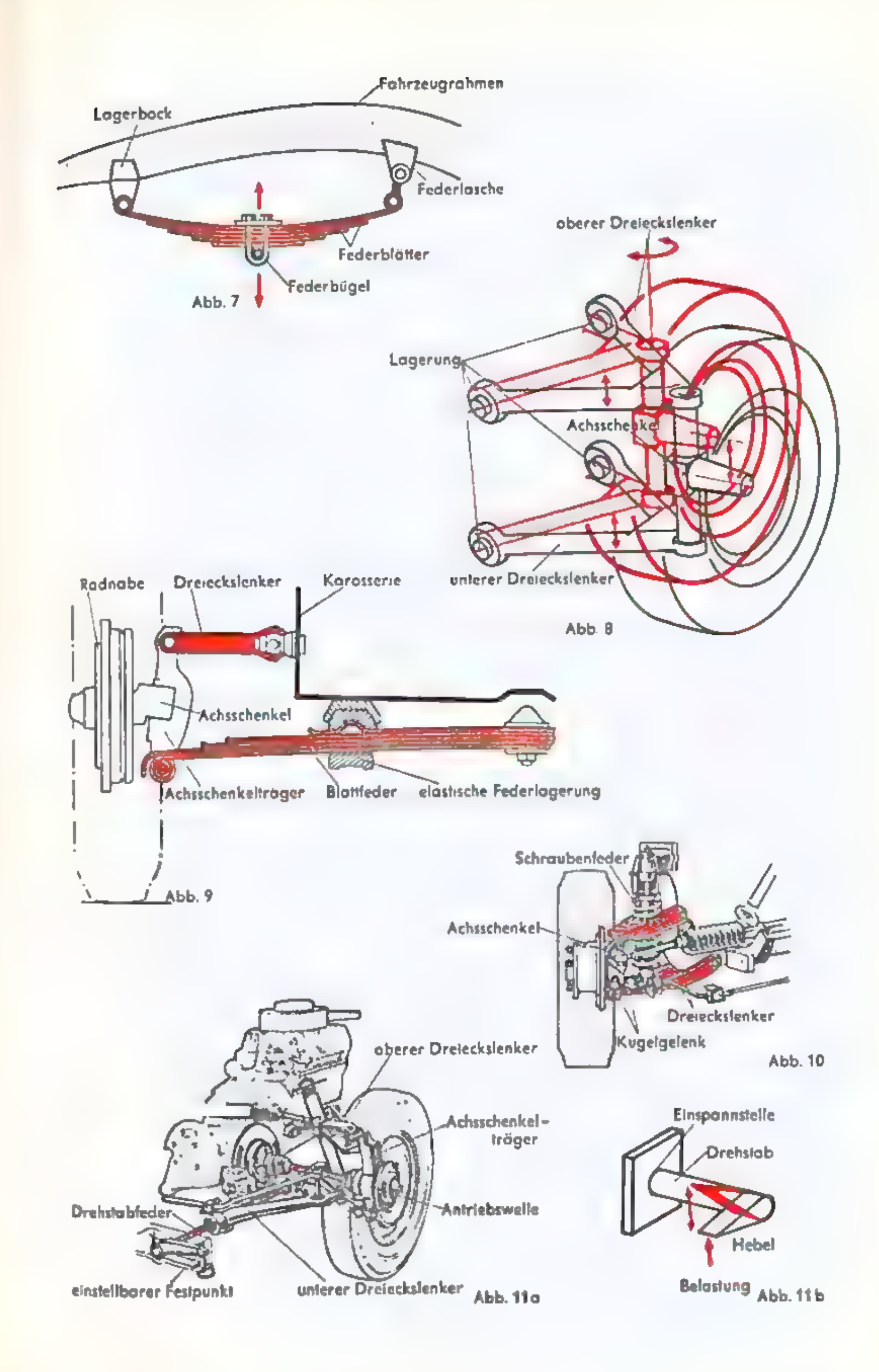


Abb. 7

Abb. 8

Abb. 9

Abb. 10

Abb. 11a

Abb. 11b

FAHRWERK III (VORDERACHSE)

Abb. 11 zeigt die Achskonstruktion eines Personenwagens mit Vorderradantrieb. Um Platz für die zwischen den zwei Dreieckslenkern geführte Antriebswelle zu schaffen, wird an Stelle der Schraubenfeder (Abb. 10) eine Drehstabfeder verwendet. Der untere Dreieckslenker ist fest mit dem einen Ende der Drehstabfeder verbunden, das andere Ende wird in einem verstellbaren Festpunkt gehalten. Unter der Radbelastung, die auf den unteren Dreieckslenker als Hebelarm wirkt, verdrillt sich der Dreh- oder Torsionsstab federnd (Abb. 11b). Die Antriebswelle muß dem Einfedern und Schwenken des Rades folgen können und weist daher je ein Gelenk an der Getriebe- und an der Radseite auf. Den Mittenversatz des Rades gleicht ein Schiebestück aus. Die Antriebswelle gleicht daher in ihrem Aufbau einer Gelenkwelle. Für die Achskonstruktion schneller Fahrzeuge wird zur Erzielung guter Straßenlage unter anderem (z.B. Berücksichtigen der Massenträgheit) ein möglichst geringes Gewicht der die Federbewegungen ausführenden Achsteile angestrebt. Diese Forderung erfüllt das McPherson-Federbein (Achsschenkelfederbein), das eine Weiterentwicklung und Vereinfachung der Doppelquerlenkerachse darstellt. Der Achsschenkel mit dem Radzapfen, auf dem sich das Rad dreht, ist fest mit dem Außenrohr des Zweirohrdämpfers (vgl. auch Stoßdämpfer S. 484f.) verschweißt (Abb. 12a). Dieses Außenrohr schwenkt beim Lenken mit dem Rad, denn der am unteren Ende des Federbeines angebrachte Spurstangenhebel steht mit dem Lenkgetriebe über eine Spurstange in Verbindung (s. S. 486 ff.). An Stelle eines oberen Querlenkers ist die Kolbenstange des Stoßdämpfers mittels eines elastischen Stützlagers mit der Karosserie gelenkig verschraubt. Ein kugeliges Führungsgelenk am unteren Ende des Federbeines stellt die Verbindung mit dem Querlenker her. Der Querlenker wird häufig in der Form eines einfachen Hebels ausgeführt, dessen Drehpunkt in dem Vorderachsträger liegt. Als Lager dient ein wartungsfreies Gummigelenk. Die Aufnahme der längsgerichteten Fahr- und Bremsreaktionskräfte erfolgt über eine schräg angeordnete Zugstrebe. Diese ist sowohl im Vorderachsträger als auch im Querlenker elastisch mit Gummigelenken befestigt. Als Federelement findet meist eine Schraubenfeder Verwendung, die über das Federbein gestülpt ist. Die Feder stützt sich oben gegen die Karosserie, unten gegen einen am Außenrohr des Federbeines angebrachten Blechteller ab. Abb. 12b zeigt das McPherson-Federbein eines Wagens mit Frontantrieb.
Eine Achskonstruktion mit Doppellängslenkern stellt Abb. 13 dar. An zwei parallel übereinander, quer zur Fahrtrichtung angeordneten Drehstäben ist jeweils in Fahrtrichtung ein Längslenker angeordnet. Die beiden Torsionsstäbe sind in der Mitte der Achse fest eingespannt. Unter der Radlast, die an den mit dem Achsschenkel dreh- und schwenkbar verbundenen Längslenkern angreift, verdrillen sich federnd die Drehstäbe. Damit führt das Rad beim Ein- und Ausfedern eine Hubbewegung aus, wobei Spur und Sturz unverändert bleiben. Die vollständige Doppellängslenkerachse ist in Abb. 14 dargestellt.

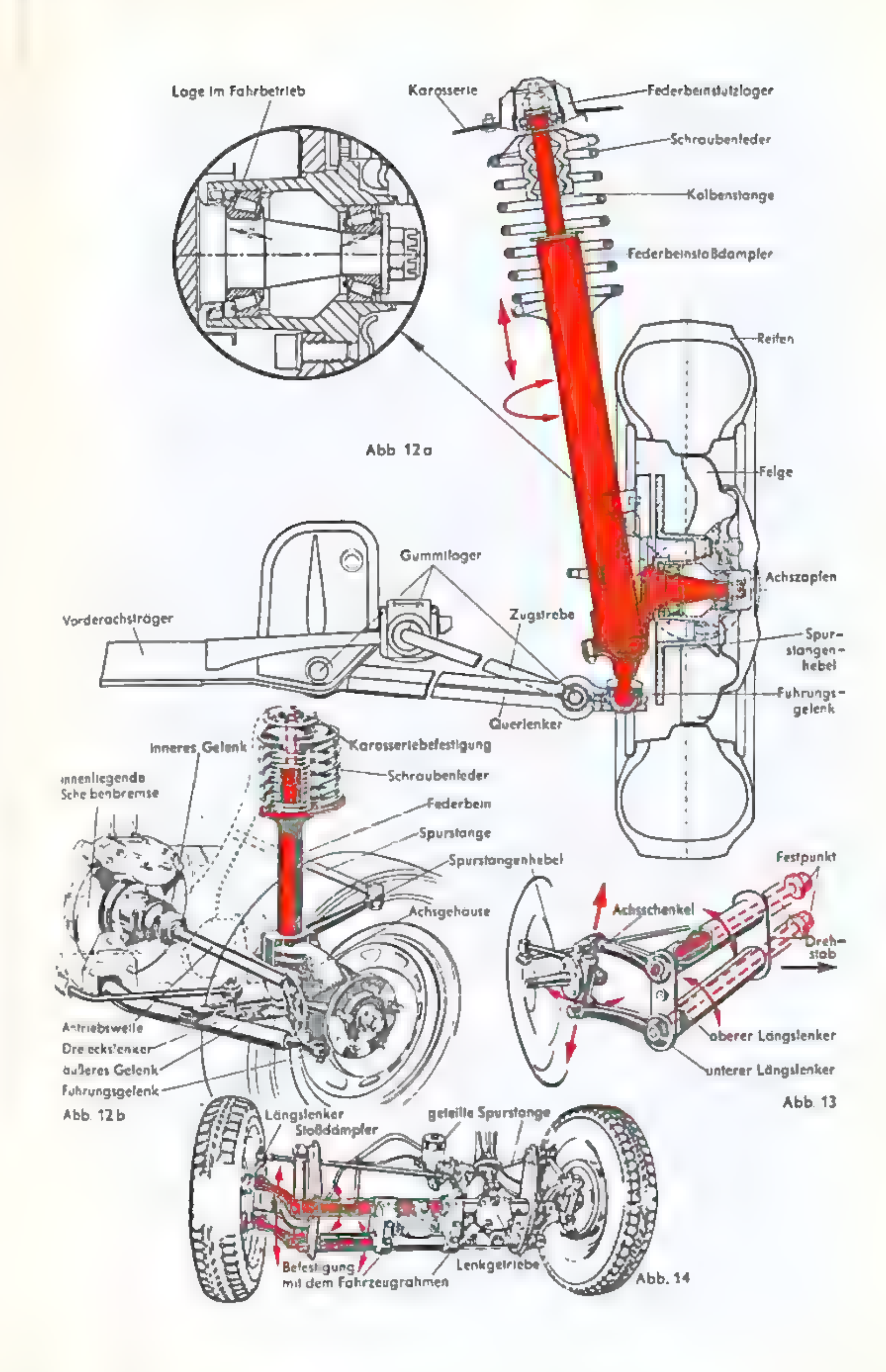


Abb. 12a

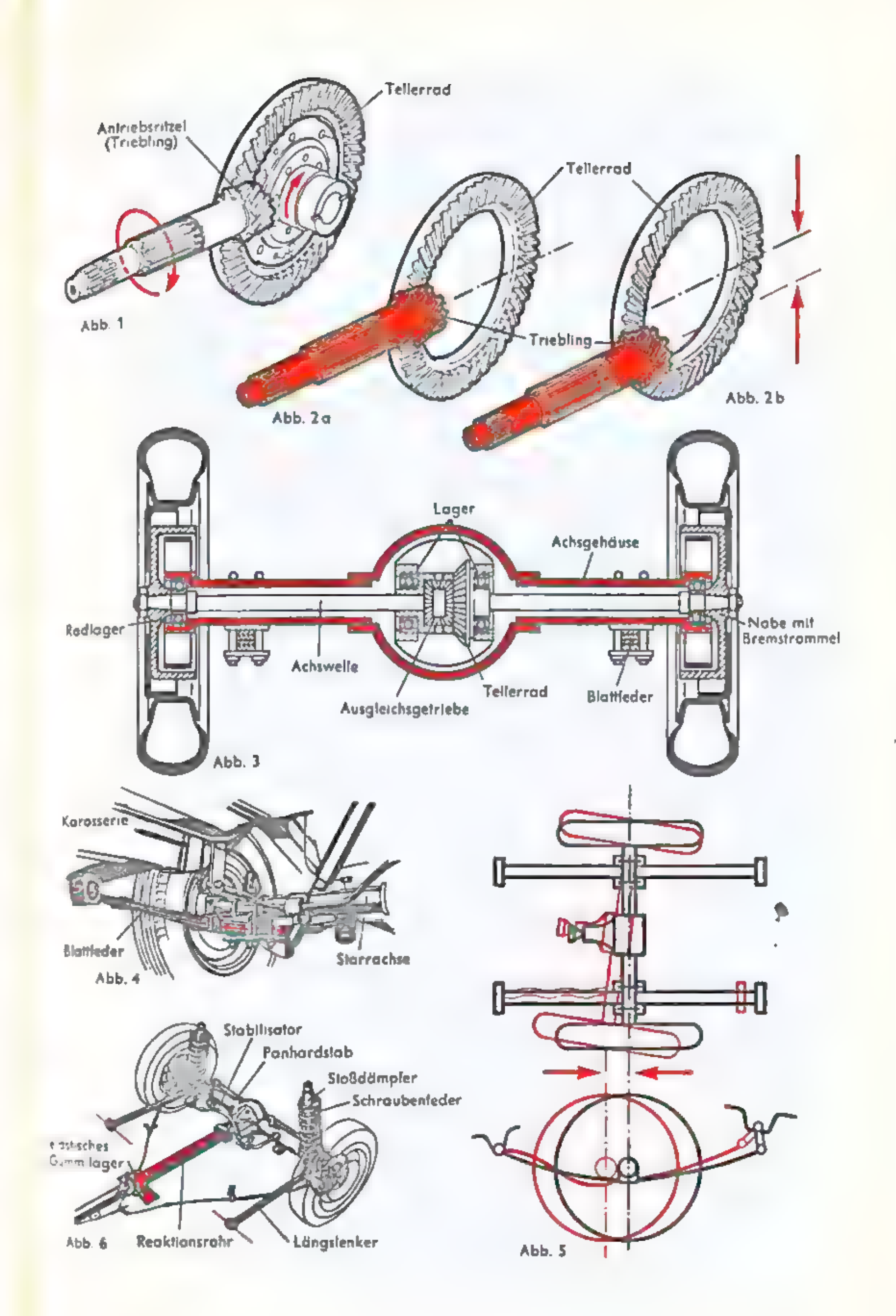
Abb. 12b

Abb. 13

Abb. 14

FAHRWERK IV (HINTERACHSEN)

Das Hinterachsensystem von Kraftfahrzeugen mit Hinterradantrieb umfaßt das Winkelgetriebe, das Differential, die beiden Seitenwellen, die Radbefestigungen und Radaufhängungen. In den meisten Fällen ist der Motor in Längsrichtung des Wagens eingebaut. Zur Übertragung des Motordrehmomentes auf die quer zur Fahrtrichtung angeordnete Antriebsachse und damit auf die beiden Antriebsräder, ist ein Winkelgetriebe erforderlich. Mit dem Winkelgetriebe wird gleichzeitig die hohe Motordrehzahl auf die entsprechend niedere Drehzahl der Antriebsräder untersetzt. Das Untersetzungsverhältnis richtet sich unter anderem nach der Motorleistung, Motordrehzahl und nach dem wirksamen Rolldurchmesser der Antriebsräder. Das Untersetzungsverhältnis beträgt in der Regel 1 : 3 bis 1 : 5. Das heißt, die Drehzahl der beiden Achswellen und der damit verbundenen Antriebsräder entspricht $^1/_3$ bis $^1/_5$ der Motordrehzahl, sofern im Wechselgetriebe (s. S. 504) nicht noch eine weitere Untersetzung erfolgt. In den meisten Anwendungsfällen besteht das Winkelgetriebe aus einem Kegelradpaar. Das vom Motor angetriebene Kegelrad wird Antriebsritzel oder Triebling bezeichnet. Dieses wälzt sich auf dem entsprechend größeren Tellerrad ab (Abb. 1). Die Kegelräder sind meist spiral verzahnt, so daß die Zähne allmählich und nicht stoßweise in Eingriff kommen. Außerdem überschneidet sich der Eingriff mehrerer Zähne. Dadurch erreicht man einen nahezu geräuschlosen Lauf und eine günstige Kraftverteilung. Bei dem Kegelwälzgetriebe liegt die Mittellinie des Antriebsritzels und des Tellerrades auf gleicher Höhe (Abb. 2a). Liegt dagegen die Mittellinie des Trieblings nicht auf gleicher Höhe wie die Mittellinie des Tellerrades, so handelt es sich um ein Hypoidgetriebe (Abb. 2b). Diese Bauart ermöglicht die tiefliegende Anordnung des Antriebsritzels, wodurch die Kardanwelle, die das Schaltgetriebe mit dem Hinterachsgetriebe verbindet, tief verlegt werden kann. Damit ergibt sich ein geringerer Platzbedarf für den Kardantunnel im Inneren des Fahrzeuges. Beim Abwälzen der Zähne eines Hypoidgetriebes entstehen an den Berührungsflächen sehr hohe Pressungen, die das Schmiermittel wegzudrükken versuchen. Daher erfordert diese Getriebeart zur Schmierung ein spezielles Hypoidgetriebeöl, das sich durch besonders hohe Druckfestigkeit auszeichnet. Das Ausgleichsgetriebe, das bei Kurvenfahrt die unterschiedliche Weglänge der beiden Antriebsräder ausgleicht, ist auch mit dem Tellerrad verbunden.
Vom Ausgleichsgetriebe aus erfolgt der Antrieb der beiden Antriebsräder. Die Lagerung der Antriebsräder, sowie deren Verbindung mit dem Ausgleichsgetriebe ist von der Bauart der Hinterachse abhängig. Für die angetriebenen Hinterräder gibt es verschiedene Achskonstruktionen, die sich grundsätzlich voneinander unterscheiden: Bei der starren Hinterachse sind die beiden Antriebsrader in einem starren Achsgehäuse gelagert, das außerdem das Winkel- und das Ausgleichsgetriebe aufnimmt. Das Motordrehmoment wird von dem Ausgleichsgetriebe auf die Antriebsräder mittels zweier Achswellen übertragen. Diese Achs- oder Seitenwellen sind ebenfalls im starren Achsgehäuse untergebracht. Das Gehäuse ist bei Personenwagen aus Blechpreßteilen zusammengeschweißt (Abb. 3). Die starre Hinterachse hat neben ihrem einfachen Aufbau den Vorzug, daß beim gleichzeitigen Einfedern des Fahrzeuges oder bei der Seitenneigung des Aufbaues keine Änderung der Radstellung erfolgt; Spur und Sturz bleiben konstant. Die Verbindung der Starrachse mit dem Fahrgestell oder Fahrzeugkörper erfolgt mitunter alleine mittels halbelliptischer Blattfedern. Bei dieser Ausführung übernehmen die Federelemente gleichzeitig die



FAHRWERK V (HINTERACHSE)

Aufgabe, die Achse abzufedern und zu führen (Abb. 4). Die beiden Blattfedern müs-
sen die Seitenführungskräfte sowie die Antriebs- und Bremsreaktionskräfte über-
tragen, unter denen sich die Feder verformt, wodurch es zum ungewollten einseitigen
Auslenken der Starrachse und zum Springen der Antriebsräder kommt (Abb. 5).
Dies führt zu einer Verschlechterung der Straßenlage. Die Führung der angetriebenen
starren Hinterachse erfolgt heute bei Personenwagen durch entsprechende Bauele-
mente, so daß den Federelementen nur noch die eigentliche Federungsaufgabe zu-
kommt. Abb. 6 zeigt eine nach den modernsten Gesichtspunkten ausgeführte starre
Hinterachse. Das Differentialgehäuse ist in Fahrtrichtung durch ein Rohr verlängert,
das an seinem vorderen Ende ein elastisches Gummi-Metall-Element trägt. Dieses ver-
bindet das Reaktionsrohr elastisch mit dem Fahrzeugkörper und stützt die Anfahr-
und Bremsreaktionskräfte der Achse gegen das Fahrzeug ab. Die Längsführung der
Achse erfolgt durch dieses Reaktionsrohr und durch zwei unmittelbar neben den
Rädern am Achsgehäuse angehängten Längslenkern. Das sind einfache, schwenkbar
gelagerte Schubstangen. Die Schraubenfedern sprechen leichter auf Fahrbahn-
unebenheiten an als Blattfedern, können aber keine Seitenkräfte von der Achse auf
das Fahrzeug übertragen. Diese Funktion übernimmt ein Panhardstab der einerseits
in Höhe des einen Federangriffspunktes drehbar mit der Achse verbunden, anderer-
seits in Höhe der zweiten Feder drehbar an dem Wagenkörper angebracht ist (Abb. 7).
Ein Nachteil der Starrachse ist ihr hohes ungefedertes Gewicht. Für schnelle Sport- und
Rennwagen wird die sehr aufwendige und teure De-Dion-Bauart angewandt (Abb. 8).
Beide Räder sind hierbei starr durch ein Querrohr verbunden. Die Abstützung dieser
Starrachse gegen Seitenkräfte übernimmt ein Panhardstab. Zur Führung der Achse
in Längsrichtung dienen jeweils zwei übereinanderliegende Längslenker, die unmit-
telbar neben den Rädern mit der Achse befestigt sind. Diese Längslenker übertragen
die Fahr- und Bremsreaktionskräfte. Das schwere Hinterachsgetriebe ist von der
Achse getrennt an dem Wagenkörper befestigt. Beim Ein- und Ausfedern der Achse
verändern sich die Lage und der Abstand der beiden Räder von dem Hinterachsge-
triebe. Die zwei Seitenwellen sind daher an beiden Enden mit je einem Kreuzgelenk
versehen und weisen jeweils ein Schiebestück auf. Die Hinterachse von Fahrzeugen
mit Frontantrieb ist häufig als Starrachse ausgeführt: Die beiden Hinterräder sind
drehbar auf einem starren Achsrohr gelagert (Abb. 9). Die Achse wird beiderseits
durch einen Kurbelarm geführt, der jeweils beim Ein- und Ausfedern einen Torsions-
stab verdreht. Die Seitenführung der Achse übernimmt ein Panhardstab.
Das Hinterachsgetriebe einer Pendelachse ist mit dem Fahrgestell oder dem Wagen-
körper verschraubt. Die Antriebswellen der Hinterräder sind gelenkig mit dem Aus-
gleichsgetriebe verbunden, dabei pendeln die beiden Räder an Achsrohren in denen
die Antriebswellen liegen (Abb. 10). Die Achsrohre haben ihren Drehpunkt im Dreh-
punkt der Seitenwelle und übernehmen die Seitenführung der Räder. Eine Feder-
strebe, die jeweils am äußeren Ende des Achsrohres in Nähe des Rades angreift, liegt
in Fahrtrichtung. Die Federstrebe arbeitet als Kurbelarm auf einen quer zur Fahrt-
richtung angeordneten Drehstab. Beim Ein- und Ausfedern der Pendelachse wird
der Drehstab von der Federstrebe verdrillt. Die Federstrebe übernimmt gleichzeitig
die Längsführung des Rades sowie die Fahr- und Bremsreaktionskräfte. Durch den

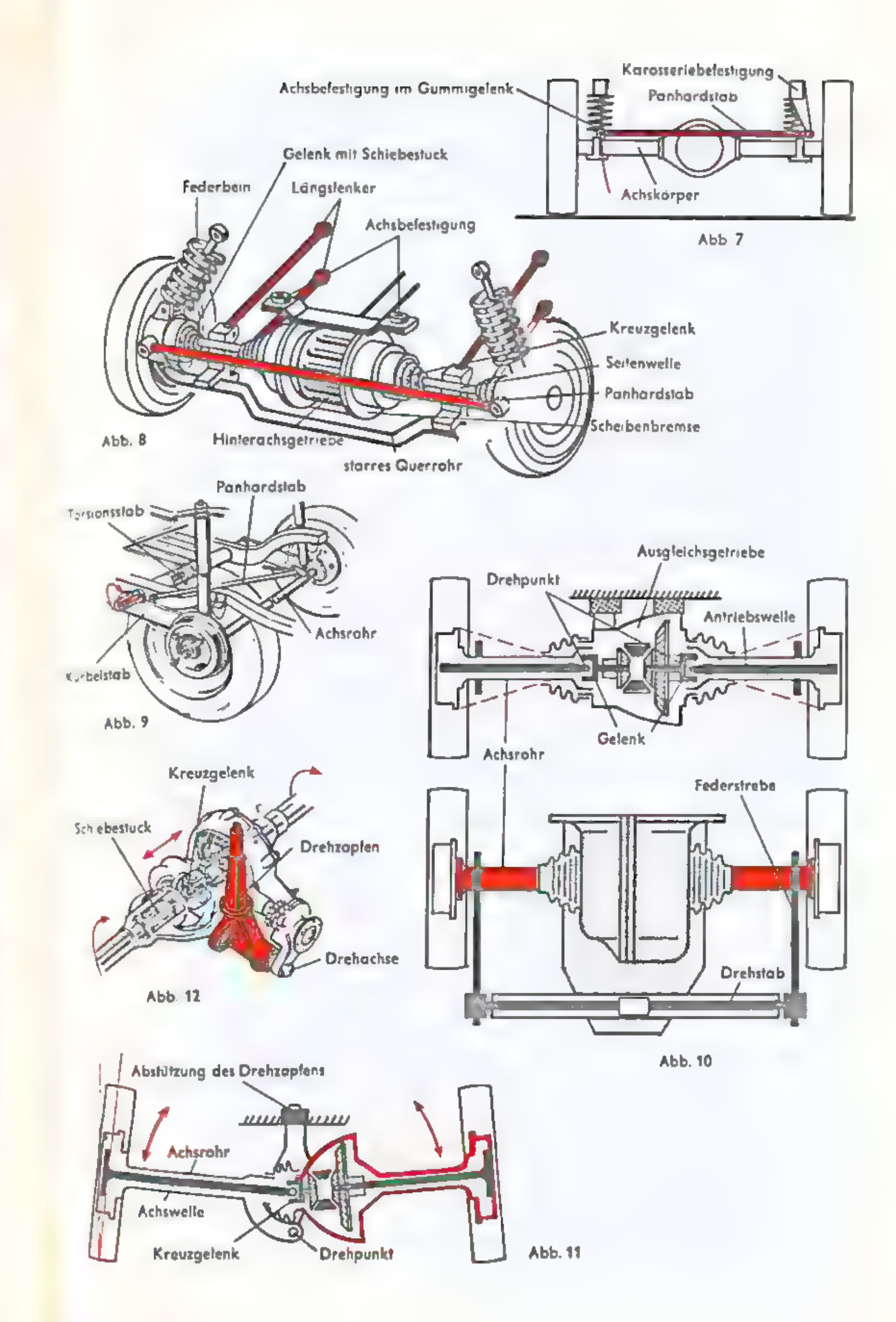


Abb. 7

Abb. 8

Abb. 9

Abb. 10

Abb. 11

Abb. 12

außen am Ausgleichsgetriebe liegenden Drehpunkt des Achsrohres ist der Abstand von dort zur Reifenmitte klein. Das Einfedern des Rades ist daher mit einer Spur- und Sturzänderung verbunden. Dadurch wird die Haftung des Reifens auf glatter Fahrbahn vermindert. Diesen Nachteil weist die Eingelenkpendelachse in nicht so starkem Maße auf. Das Hinterachsgetriebe ist bei dieser Bauart fest mit dem Achsrohr der einen Pendelachse verbunden (Abb. 11) und schwingt beim Ein- und Ausfedern mit diesem mit. Die Verbindung der zweiten Achswelle mit dem Ausgleichsgetriebe erfolgt über ein Kreuzgelenk. Durch die Verlegung des Drehpunktes beider Pendelachshälften unter den Drehpunkt dieses Kreuzgelenkes verändert sich beim Ein- und Ausfedern der Abstand der beiden inneren Wellenenden. Die eine Wellenhälfte ist daher mit einem Schiebestück versehen (Abb. 12). Die Achsrohre übernehmen die Seitenführung und das Fahr- und Bremsmoment der Pendelachsen, die Schubstreben die Längsführung. Der Drehzapfen, auf dem die beiden Achshälften drehbar gelagert sind, wird über zwei Hebel vertikal und horizontal am Fahrzeugkörper abgestützt (Abb. 13). Zur Verbesserung der Seitenführungskraft der Reifen ist der Sturz der Hinterräder negativ ausgeführt (Abb. 11). Diese X-Stellung der Räder bewirkt eine bessere Abstützung der Reifen bei Kurvenfahrt.
Die Schräglenkerachse stellt die zur Zeit modernste Hinterachsbauart dar. Das Hinterachsgetriebe ist über Gummipuffer mit einem Querträger und über diesen mit dem Fahrzeugkörper elastisch verbunden (Abb. 14). Die beiden Hinterräder schwingen beim Ein- und Ausfedern um dreiecksförmige Längslenker. Diese sind um 20° schräggestellt (Abb. 15) und über Gummi-Metall-Elemente ebenfalls mit dem Querträger verbunden. Die Hinterräder sind an kurzen Achswellen befestigt und mittels Kugellager im Schräglenker drehbar gelagert. Der Schräglenker übernimmt die Längs- und Seitenführung des Rades sowie die Fahr- und Bremsreaktionskräfte und bewirkt beim Einfedern eine nur geringe Spuränderung. Durch eine entsprechend verschränkte Anordnung des Schräglenkers kann der Drehpunkt der Achse so gelegt werden, daß beim Einfedern die Sturzänderung des Rades gering bleibt (Abb. 15). Bei der Federbewegung des Rades verändert sich dessen Lage und Abstand von dem Hinterachsgetriebe. Die Abtriebswelle ist daher einerseits mit dem Hinterachsgetriebe über ein Kreuzgelenk, andererseits mit der Hinterachswelle über ein Gelenk mit Schiebestück verbunden, das die Längenänderung zuläßt. Die Hinterräder weisen negativen Sturz auf.
Stabilisatoren sind meist Drehstäbe, die die Fahreigenschaften eines Wagens stabilisieren sollen. Der Drehstab ist quer zur Fahrtrichtung angeordnet und an zwei Stellen über Gummilager drehbar mit dem Fahrzeug verbunden. Der an beiden Enden abgebogene Drehstab bildet ein U. Die Schenkel des U sind jeweils mit einer Seite der Achse verbunden (Abb. 16). Sie wirken als Hebelarm auf den Drehstab. Federn beide Räder gleich stark ein, so spricht der Stabilisator nicht an. Wird aber der Aufbau und damit das Fahrgestell bei Kurvenfahrt in Folge der Fliehkraft zur Seite geneigt, so federt das kurveninnere Rad stärker ein als das äußere. Der Drehstab wird dadurch verdrillt. Seine Federkraft wirkt der Seitenneigung entgegen. Die Anordnung des Stabilisators bei einer Querlenker-Vorderachse zeigt Abb. 17. An der starren Hinterachse verhindert der Stabilisator nicht nur die Seitenneigung des Fahrzeuges, sondern auch das einseitige Abheben eines Rades und das „Trampeln" der Achse.

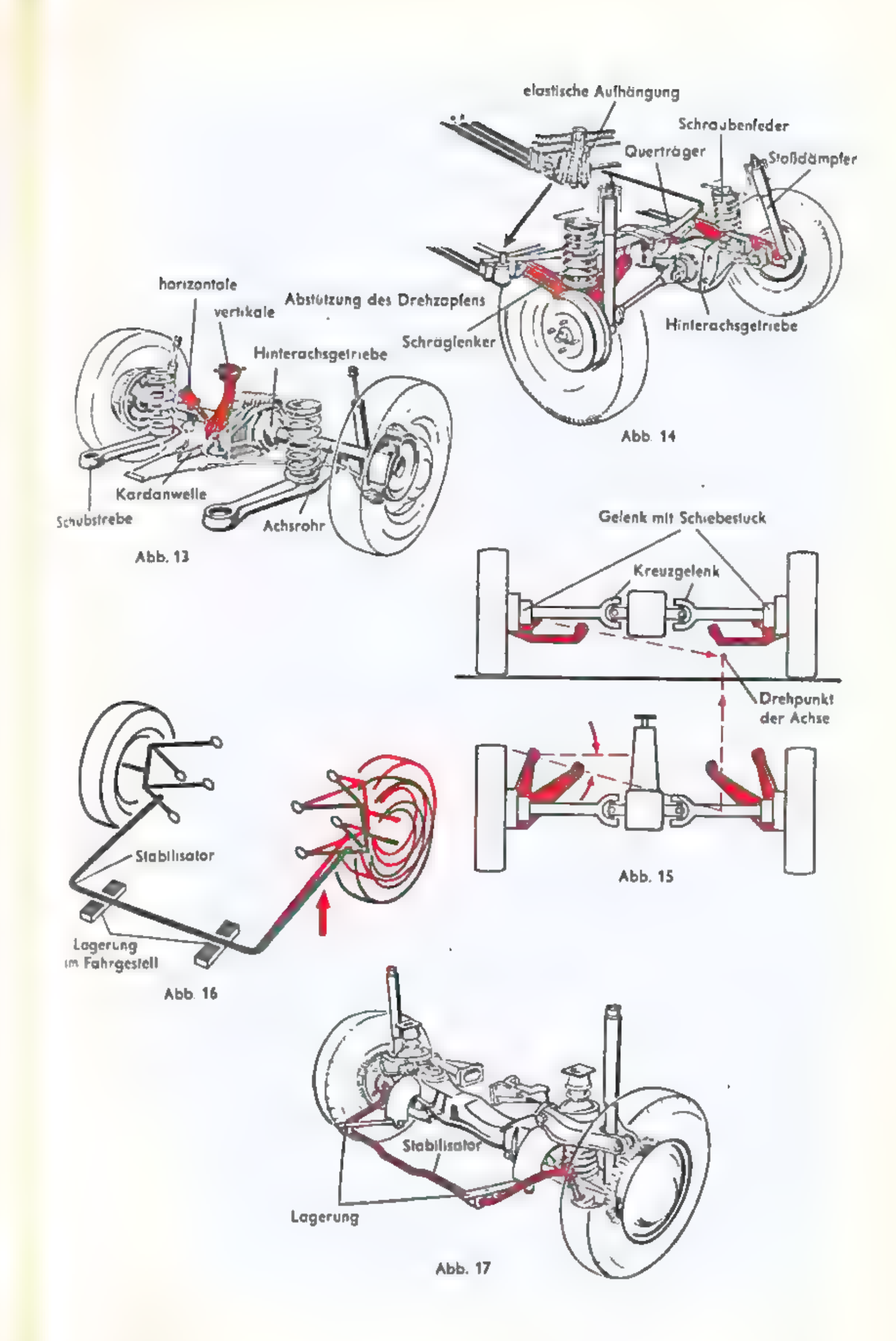


Abb. 13
Abb. 14
Abb. 15
Abb. 16
Abb. 17

MODERNE FEDERUNGSSYSTEME I

Die auf S. 472 ff. beschriebenen konventionellen Federelemente erfüllen nicht alle Anforderungen in befriedigendem Maße. Zur Verbesserung des Fahrkomforts und der Fahrsicherheit haben die Automobilkonstrukteure neuartige Federungsprinzipien entwickelt.

Beim Überfahren von Bodenunebenheiten beginnt der gefederte Fahrzeugaufbau um seine Querachse zu schwingen (Nicken; Abb. 1). Die Frequenz dieser Nickschwingung hängt vom Abstand der Achsen zueinander, also vom Radstand ab. Sie ist für Kleinwagen wegen des kurzen Radstandes besonders groß und beeinträchtigt die Fahrsicherheit. Die Hydrolastic-Verbundfederung macht die Frequenz der Nickschwingungen von der Größe des Radstandes unabhängig. Dies wurde durch die gegenseitige Verbindung der Federelemente der Fahrzeugräder jeder Wagenseite erreicht. Diese Verbindung stellt eine mit Flüssigkeit gefüllte Leitung her (Abb. 2). Das an jedem Rad angeordnete Federelement enthält am oberen Ende einen nach oben konisch verlaufenden, hohl ausgebildeten Gummikörper als Federkissen, der mit dem Federgehäuse fest verbunden ist (Abb. 3a). Das Federgehäuse ist am unteren Teil durch eine elastische, nylonverstärkte Gummimembran abgeschlossen. Auf der Membran stützt sich ein konischer Kolben ab, der seinerseits mit der betreffenden Radaufhängung gekoppelt ist. In dem Hohlraum des Federaggregates befindet sich eine Flüssigkeit (hauptsächlich ein Gemisch aus Wasser und Frostschutzmittel). Der Hohlraum wird durch einen glockenförmigen Stahlblechkörper in zwei Kammern unterteilt. Diese Blechglocke trägt seitlich eine Bohrung und am oberen Ende ein Zweiwegdämpfungsventil. Der obere Teil der mit Flüssigkeit gefüllten Kammer steht über eine Leitung mit dem entsprechenden Raum des Federelementes in Verbindung, das das zweite Rad der gleichen Wagenseite abstützt (Abb. 2 u. 3). Überfährt das Vorderrad eine Erhöhung, so wird es etwas angehoben. Der mit der Radaufhängung verbundene Kolben bewegt sich nach oben und verdrängt Flüssigkeit aus der unteren Kammer. Diese gelangt durch die Ausgleichsbohrung und durch das Dämpfungsventil der glockenförmigen Unterteilung in die obere Kammer. In dieser steigt der Druck an, wodurch sich die Gummifeder elastisch verformt. Der Druckanstieg wird durch die Verbindungsleitung schnell auf das hintere Federaggregat übertragen. Die aus dem Federelement des Vorderrades verdrängte Flüssigkeit gelangt über die Verbindungsleitung in die obere Kammer des hinteren Federaggregates. Die Flüssigkeit strömt durch die Ausgleichsbohrung und durch das Dämpfungsventil in die untere Kammer. Der Kolben bewegt sich nach unten. Das Rad hat aber keine Möglichkeit, nach unten auszuweichen, daher wird das Wagenheck angehoben (Abb. 3a). Überfahren beide Räder gleichzeitig eine Bodenunebenheit, so verdrängen die Kolben beider Federelemente Flüssigkeit aus der unteren in die obere Kammer (Abb. 3b). Unter dem Druckanstieg verformen sich die Gummifederkissen.

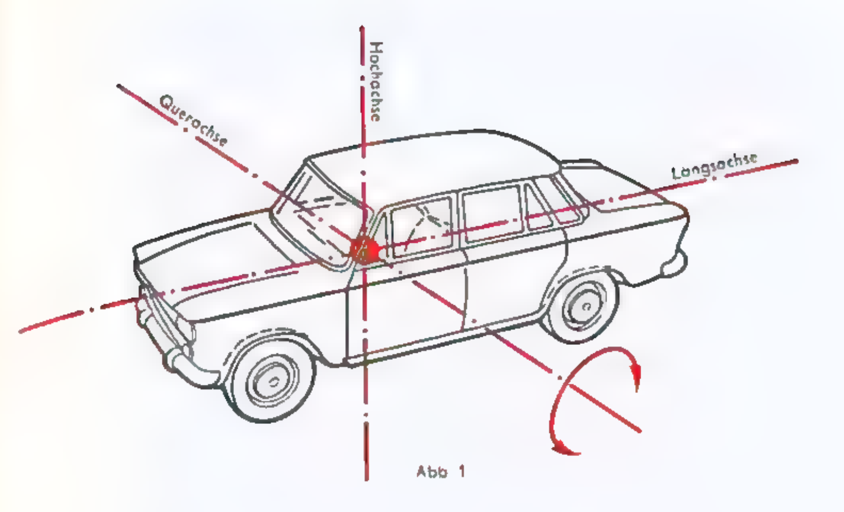


Abb 1

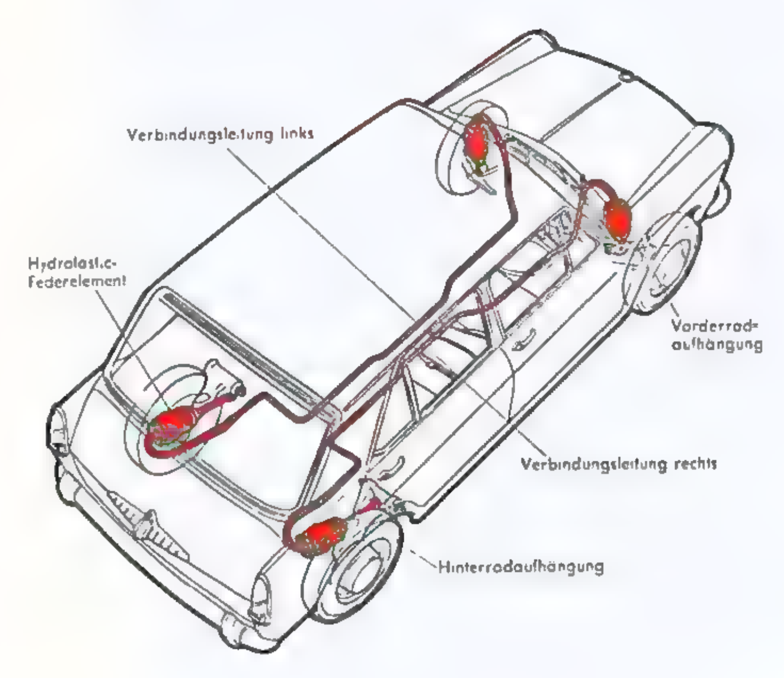


Abb. 2

MODERNE FEDERUNGSSYSTEME II

Es fließt jedoch keine Flüssigkeit durch die Verbindungsleitung, sofern in beiden Federelementen der gleiche Druck herrscht. Deswegen wird der Wagen dann gleichmäßig angehoben. In senkrechter Richtung auftretende Radschwingungen bremst das gummibelastete Dämpfungsventil, denn die Ausgleichsbohrung in der Blechglocke und die Öffnung des Zweiwegdämpfungsventils drosselt die von der einen in die andere Kammerhälfte fließende Flüssigkeit um so stärker, je schneller die Flüssigkeit durch diese strömt. Damit stellt die Hydrolastic-Verbundfederung ein Gummifederkissen mit eigener Schwingungsdämpfung dar. Das hydropneumatische Federsystem nach Abb. 4 hat den Vorteil einer weichen Federung, die sich mit zunehmender Belastung verhärtet. Dieses System ermöglicht es außerdem, die Bodenfreiheit des Wagens unabhängig von seiner Belastung gleichzuhalten. Die vier einzeln aufgehängten Räder sind durch Schwingarme mit dem Fahrgestell verbunden. Der Schwingarm jedes einzelnen Rades ist mit einem Kolben gekoppelt, der sich entsprechend der senkrechten Bewegung des Rades in einem Zylinder auf und ab bewegt. Der Zylinder erweitert sich im oberen Teil in eine Hohlkugel. Die Kugel ist durch eine vollkommen dichte, elastische Gummimembran in zwei Kammern geteilt. In der oberen Kammer befindet sich Stickstoff unter Druck. Die untere Kammer und der zugehörige Teil des Zylinders sind mit einer Spezialflüssigkeit gefüllt. Federt das Rad ein, so drückt der Schwingarm den Kolben entsprechend tief in den Zylinder ein. Die Flüssigkeit wird dabei in die untere Kugelkammer gepreßt. Entsprechend der Flüssigkeitsmenge, die in die untere Kugelkammer eintritt, verringert sich das Volumen des in der oberen Kammer eingesperrten Gases. Der Druck des Gases steigt solange an, bis in den Kammern beiderseits der Membran der gleiche Druck herrscht. Dadurch kann der Kolben nicht tiefer in den Zylinder eindringen, das Einfedern des Rades ist beendet. Sinkt die Radlast (z. B. nach Überfahren einer Bodenerhebung) so dehnt sich das Gas wieder entsprechend aus und das Rad federt. Das in der oberen Kammer der Kugel eingesperrte Gas besitzt eine veränderliche Elastizität die mit steigendem Druck abnimmt. Die hydropneumatische Feder spricht daher bei kleiner Belastung sehr weich und elastisch an. Mit anwachsender Belastung tritt eine zunehmende Verhärtung des Federsystems ein. Der Höhenausgleich bei zu- oder abnehmender Belastung erfolgt, indem die im Federelement eingeschlossene unkomprimierbare Flüssigkeitsmenge verändert wird. Die Schwingarme der Vorder- und Hinterachse der voneinander unabhängig aufgehängten Räder sind jeweils durch einen Drehstabstabilisator (s. S. 476) verbunden. Wird die Belastung des Fahrzeuges erhöht, so federn die Räder zunächst ein und dadurch verdreht sich der Stabilisator (Abb. 5). Über einen am Stabilisator befestigten Hebel wird ein Dreiwegeventil betätigt, das als Höhenkorrektor arbeitet (Abb. 6a). Der Schieber des Höhenkorrektors wird dabei so nach rechts verrückt, daß Flüssigkeit von einem Druckspeicher über den Höhenkorrektor in das Federelement beider Räder einer Achse fließen kann.

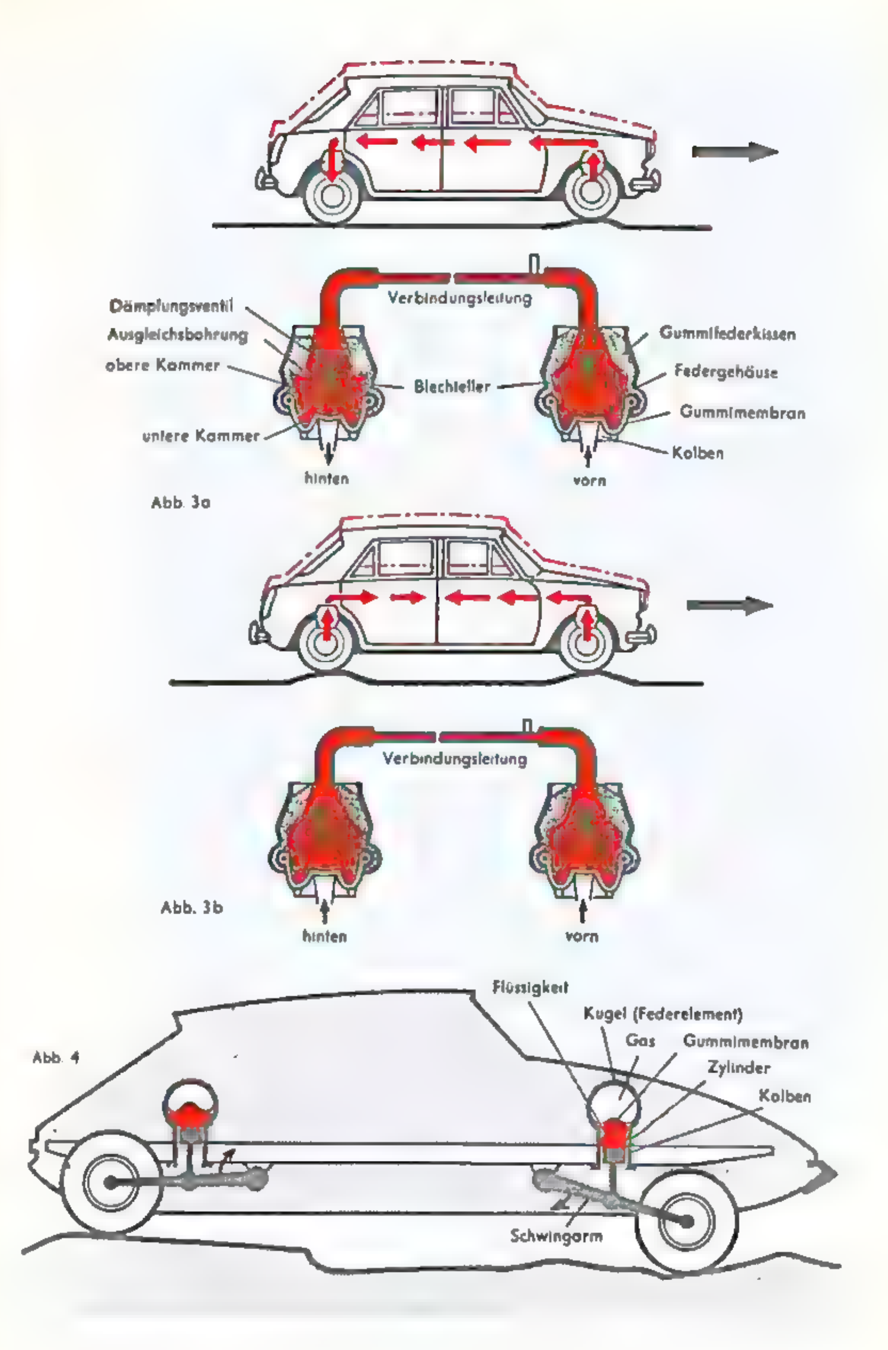


Abb. 3a

Abb. 3b

Abb. 4

MODERNE FEDERUNGSSYSTEME III

Der auf den Kolben wirkende Flüssigkeitsdruck vergrößert sich. Dadurch wird der Kolben nach unten gedrückt und die Karosserie angehoben. Die Stabilisatoren verdrehen sich und nehmen über das Gestänge den Schieber des Höhenkorrektors mit. Dies geschieht so lange, bis der Schieber seine neutrale Stellung einnimmt und damit der Flüssigkeitszulauf zu den Federelementen unterbrochen ist; die ursprungliche Bodenfreiheit des Wagens ist damit wieder erreicht (Abb. 6b). Vermindert sich die Belastung des Fahrzeuges, so hebt sich die Karosserie zunächst an, denn das unter Überdruck stehende Gas dehnt sich aus und drückt den Kolben mit der eingesperrten Flüssigkeit nach unten. Der Stabilisator dreht sich entsprechend der Schwenkbewegung der Schwingarme und nimmt den Verteilerschieber des Höhenkorrektors nach links (Abb. 7a) in Rücklaufstellung. Die Flüssigkeit fließt aus den beiden Federelementen so lange über den Höhenkorrektor in den Vorratsbehälter ab, bis die Schwingarme wieder ihre ursprüngliche Lage einnehmen und der Verteilerschieber in die neutrale Position zurückgekehrt ist (Abb. 7b), der Rücklauf ist damit unterbrochen. In diesem Federsystem ist außerdem eine Vorrichtung eingebaut, die Schwingungen des Wagenaufbaues und der Räder abschwächt. Sie arbeitet nach dem Prinzip des Stoßdämpfers (s. unten). Hierzu ist das Ende des Zylinders gegen den kugeligen Teil des Federelementes durch ein System von Bohrungen und federbelasteten Ventilen verschlossen. Der aufwärtsgehende Kolben muß die Verbindungsflüssigkeit durch Bohrungen und federbelastete Ventilöffnungen in den unteren Kugelraum pressen. Läuft der Kolben abwärts, muß Flüssigkeit aus dem unteren Kugelraum durch diese Öffnungen in den Zylinder einströmen. In beiden Strömungsrichtungen entsteht durch Reibung der Flüssigkeit in den engen Bohrungen ein erheblicher Widerstand, der aufkommende Schwingungen weitgehend abschwächt.

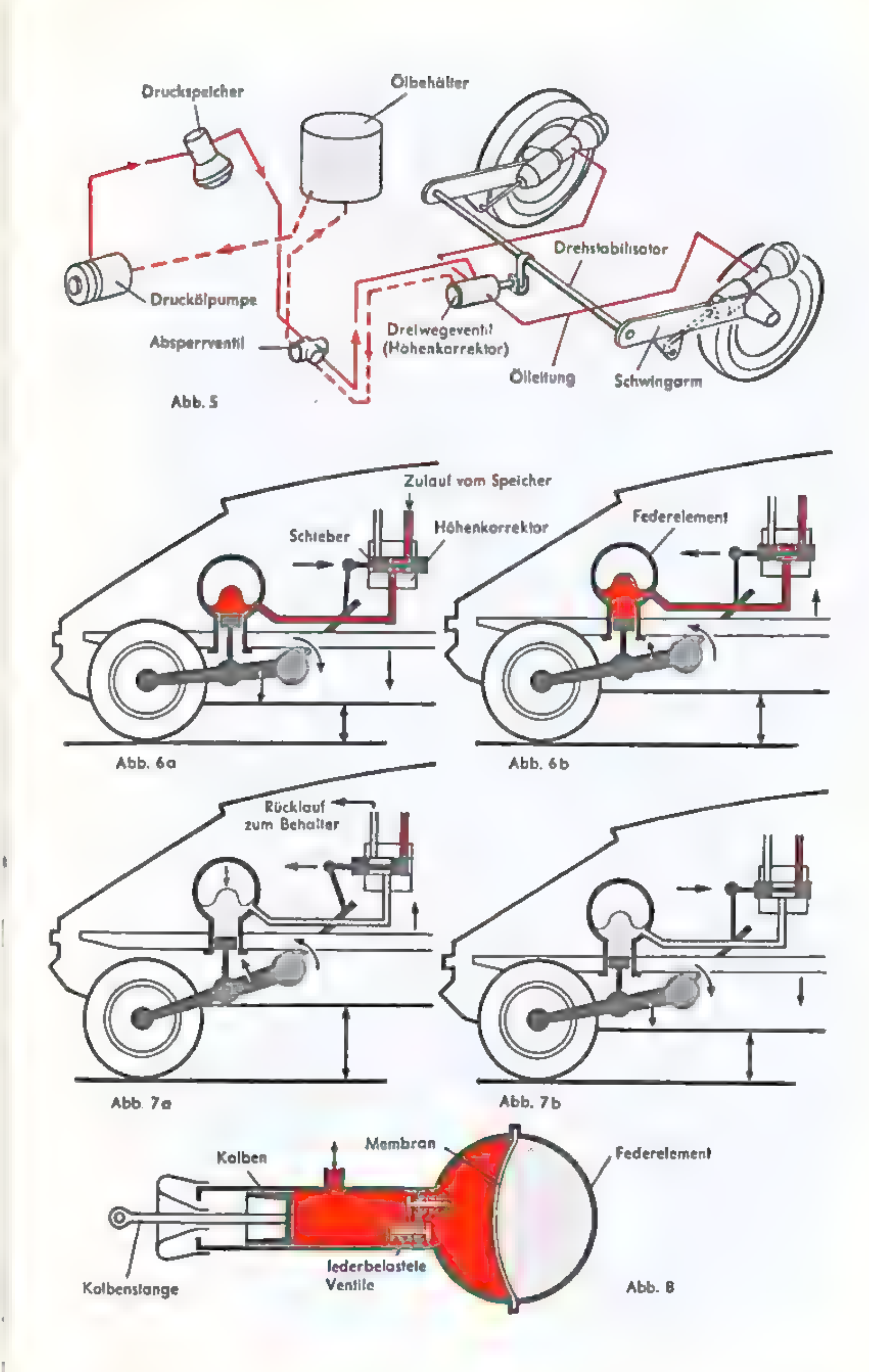


Abb. 5

Abb. 6a

Abb. 6b

Abb. 7a

Abb. 7b

Abb. 8

STOSSDÄMPFER

Die Feder einer Radaufhängung wird beim Überfahren von Fahrbahnunebenheiten fortwährend gespannt und entspannt und so zum Schwingen angeregt. Das Rad schwingt mitsamt der Radaufhängung wie ein senkrecht angestoßenes Gewicht angehängt an einer senkrechten Zylinderfeder auf und ab. Infolge der geringen Reibung (Eigendämpfung) der Feder und der Radaufhängung, würden diese Schwingungen ohne Stoßdämpfer nur sehr langsam abklingen. Der Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn wäre entsprechend der Schwingfrequenz periodisch unterbrochen, worunter die Fahrsicherheit leidet. Der zwischen Fahrzeugaufbau und Radaufhängung, möglichst in Radnähe (Abb. 1) angeordnete Schwingungsdämpfer (Stoßdämpfer) läßt diese Schwingungen sehr rasch abklingen. Die Dämpfwirkung nimmt mit steigender Schwingungszahl zu. Damit der Stoßdämpfer ein leichtes Ansprechen des Federsystems zuläßt, ist die Dämpfwirkung beim Einfedern des Rades meist geringer als beim Ausfedern.
Weit verbreitet ist der hydraulische Zweirohrstoßdämpfer (Abb. 2 a, 2 b und 3). In einem Arbeitszylinder (2) bewegt sich ein Kolben (1), der mit einer Kolbenstange (6) verbunden ist. Die Kolbenstange geht am oberen Ende in das Befestigungsauge (10) über, das eine Gummibuchse aufnimmt, die eine geräuschdämpfende Befestigung der Kolbenstange mit der Karosserie ermöglicht. Der Arbeitszylinder (2) ist von einem größeren Rohr umgeben, das am unteren Ende ein entsprechendes Befestigungsauge (11) zur Befestigung an der Radaufhängung trägt. Der vom Kolben (1) in den oberen Arbeitsraum (12) und unteren Arbeitsraum (13) unterteilte Zylinder (2) ist gänzlich, der den Arbeitszylinder umgebende Ringraum (14) teilweise mit Hydrauliköl gefüllt. Beim Einfedern des Rades wird der Kolben (1) im Arbeitsraum (12) nach unten gepreßt. Das im Kolben (1) angeordnete, federbelastete Ventil B öffnet sich (Abb. 2 a) und Öl kann von dem unteren (13) in den oberen Arbeitsraum (12) entweichen, wobei das die Bohrung mit hoher Geschwindigkeit durchströmende Öl einen großen Strömungswiderstand erfährt, der der Kolbenbewegung entgegenwirkt. Bei diesem Zusammenschieben des Dämpfers taucht die Kolbenstange (6) entsprechend weit in den oberen Teil des Arbeitsraumes (12) ein. Dies von der eintauchenden Kolbenstange (6) verdrängte Ölvolumen entweicht durch das im Boden des Arbeitszylinders (2) eingelassene federbelastete Ventil D in den als Ölspeicher dienenden Ringraum (14). Das Bodendruckventil (D) bietet dem hindurchfließenden Öl einen höheren Widerstand als das Kolbendruckventil B. Hierdurch bleiben die Arbeitsräume (12) und (13) immer völlig mit Öl gefüllt.
Beim Ausfedern geht der Kolben (1) mit der zugehörigen Kolbenstange (6) nach oben (Abb. 2 b). Der Stoßdämpfer wird auseinandergezogen. Die aus dem oberen (12) in den unteren Teil (13) des Arbeitsraumes verdrängte Ölmenge erfährt beim Durchströmen des im Kolben (1) angeordneten federbelasteten Ventiles A einen die Kolbenbewegung hemmenden Widerstand. Das Bodensaugventil C, das einen geringeren Strömungswiderstand als Ventil A aufweist, läßt diejenige Ölmenge aus dem Ringraum (14) in den unteren Arbeitsraum (13) nachströmen, die dem aus dem oberen Arbeitsraum austauchenden Volumen der Kolbenstange (6) entspricht. Die Kolbenstange (6) ist im oberen Ende des Arbeitszylinders (2) geführt. Zwischen der Stangenführung (8) und der Stangendichtung (5), die das Austreten von Öl verhindern, ist eine Entlastungsbohrung (9) zum Ringraum (14) vorgesehen.
Die bei der Kolbenbewegung entstehende Reibungswärme kann infolge der isolierenden Wirkung des Ringraumes (14) schlecht abgeführt werden. Bei dem Einrohrdämpfer (Abb. 4 und 5) wird die Reibungswärme unmittelbar von der Wand des Arbeitszylinders an die ihn umströmende Luft abgegeben. Der Einrohrdämpfer arbeitet im wesentlichen wie oben beschrieben. Anstelle der Bodenventile ist jedoch ein beweglicher, dichtender Trennkolben (4) angeordnet.

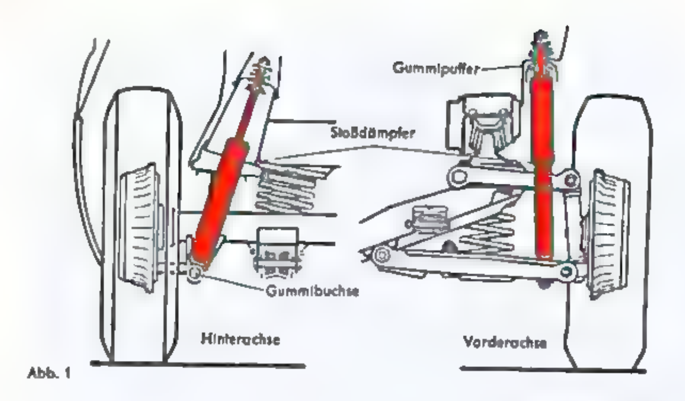


Abb. 1

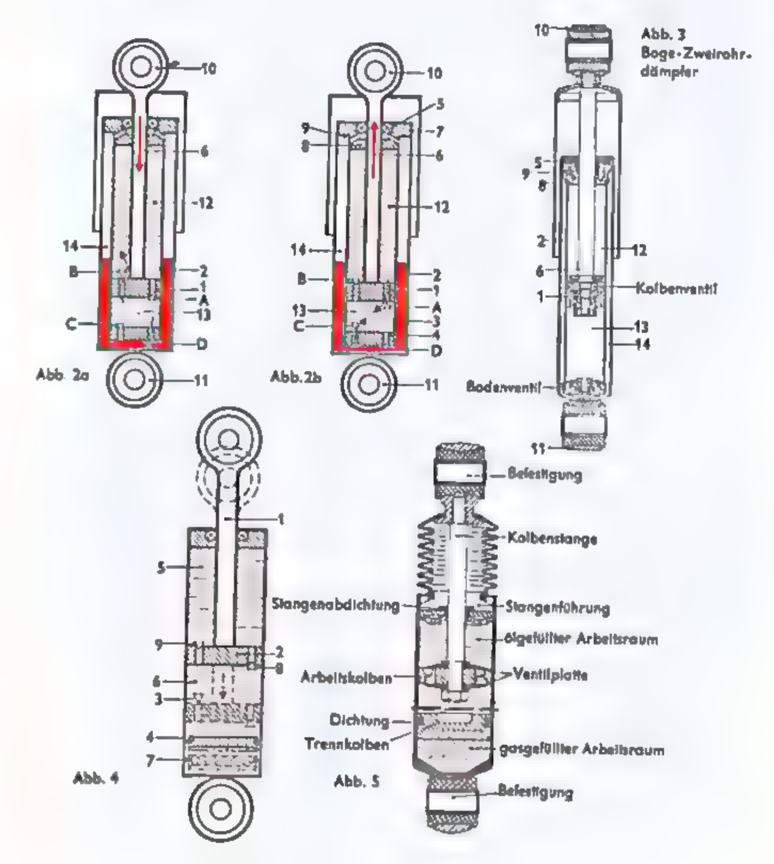


Abb. 2a Abb. 2b

Abb. 3 Boge-Zweirohr-dämpfer

Abb. 4

Abb. 5

LENKUNG I

Die Lenkung eines Fahrzeuges soll das Ändern der Fahrtrichtung und das Befahren von Fahrbahnkrümmungen ermöglichen. Die Hauptforderung, die an eine gute Lenkung gestellt wird, ist ein geometrisch einwandfreies Abrollen aller Räder (ohne Gleiten) in den Kurven. Bei Krafträdern und Dreiradfahrzeugen mit Einzelradlenkung ist diese Bedingung immer erfüllt, liegt doch hier der Mittelpunkt der Kreisbewegung stets im Schnitt der Verlängerung der gelenkten und der ungelenkten Achse. Geometrisch einwandfrei ist auch bei Vierradfahrzeugen die sogenannte Drehschemellenkung (Abb. 1 a), bei der die gesamte Lenkachse als starres System um ihren Mittelpunkt gedreht wird; sie ist bei Pferdefuhrwerken und D-Zug-Wagen sowie bei Anhängern üblich. Der Nachteil der Drehschemellenkung ist aber, daß die Stabilität des Fahrzeuges mit wachsendem Rad- bzw. Achseinschlag abnimmt und die Räder zum Einschlagen unter dem Rahmen viel Platz benötigen. Bei der Achsschenkellenkung (Abb. 1 b) treten diese Nachteile nicht auf (weil jedes gelenkte Rad seinen eigenen Drehpunkt hat), dafür genügt sie der gestellten Hauptforderung des geometrisch einwandfreien Abrollens aller Räder nur annähernd. Wie aus der Abb. 1 b ersichtlich ist, fällt die Verlängerung der Hinterachse mit der Verlängerung der beiden vorderen Achsschenkel nur dann in einem Punkt zusammen, wenn das in der Kurve innenliegende Rad einen größeren Einschlag hat als das außenliegende, denn nur dann rollen alle Räder auf konzentrischen Kreisen um den Mittelpunkt der Kreisbewegung ab. Ordnet man nun die Spurstangenhebel (Abb. 1 b) nicht parallel der Längsachse des Fahrzeuges (Lenkparallelogramm), sondern bei Geradeausfahrt in einen Winkel zur Längsrichtung an, so daß sich die Verlängerungen der Spurstangenhebel auf der Fahrzeuglängsachse schneiden, so wird angenähert erreicht, daß alle Räder bei Kurvenfahrt senkrecht zur Verbindungslinie zum gemeinsamen Mittelpunkt der Drehbewegung abrollen. Da bei dieser Anordnung bei Geradeausfahrt die beiden Spurstangenhebel, die Vorderachse und die Spurstange ein Trapez bilden, spricht man auch von einem Lenktrapez.

Bei der Achsschenkellenkung hat, wie bereits gesagt, jedes Rad seinen eigenen Drehpunkt, den Achszapfen. An diesem ist der Achsschenkel angebracht, um welchen sich das Rad beim Rollen dreht. Am Achszapfen jeder Seite ist jeweils ein kleiner Hebel (der Spurstangenhebel) angebracht. Diese Spurstangenhebel sind durch die Spurstange miteinander verbunden. Dadurch braucht das Lenksystem mit dem Lenkhebel nur an einem Achszapfen anzugreifen; der zweite Achszapfen wird dann entsprechend den durch das Lenktrapez festgelegten geometrischen Bedingungen verstellt. Bei Drehung des Lenkrades im Wageninnern überträgt das Lenkgetriebe diese Drehbewegung auf den Lenkstockhebel und die Lenkstange, die den oben erwähnten Lenkhebel bewegt, der seinerseits wiederum die Achsschenkel um den Achszapfen dreht (Abb. 2).

Bauformen von Lenkgetrieben zeigen die Abb. 3, 4 und 5. Bei der Schneckenlenkung trägt der unterste Teil der Lenkspindel ein Schnecken- oder ein Schraubengewinde, das in ein Zahnradsegment eingreift (Abb. 3). Bei der Spindellenkung wird eine Lenkmutter auf und ab bewegt (Abb. 4). Wenn die Lenkspindel gedreht wird, greift das Schneckengewinde am Ende der Spindel in das Schneckenradsegment (Abb. 4) ein und bewegt es auf oder ab. Fest mit dem als Segment ausgebildeten Schneckenrad oder der Lenkmutter verbunden ist der Lenkstockhebel, auf den diese Bewegungen übertragen werden.

Eine Abänderung der Spindellenkung stellt die sogenannte Roßlenkung dar (Abb. 5), bei der keine Lenkmutter an der Spindel auf- und abgleitet, sondern ein Finger in das Gewinde eingreift und so den Lenkstockhebel bewegt.

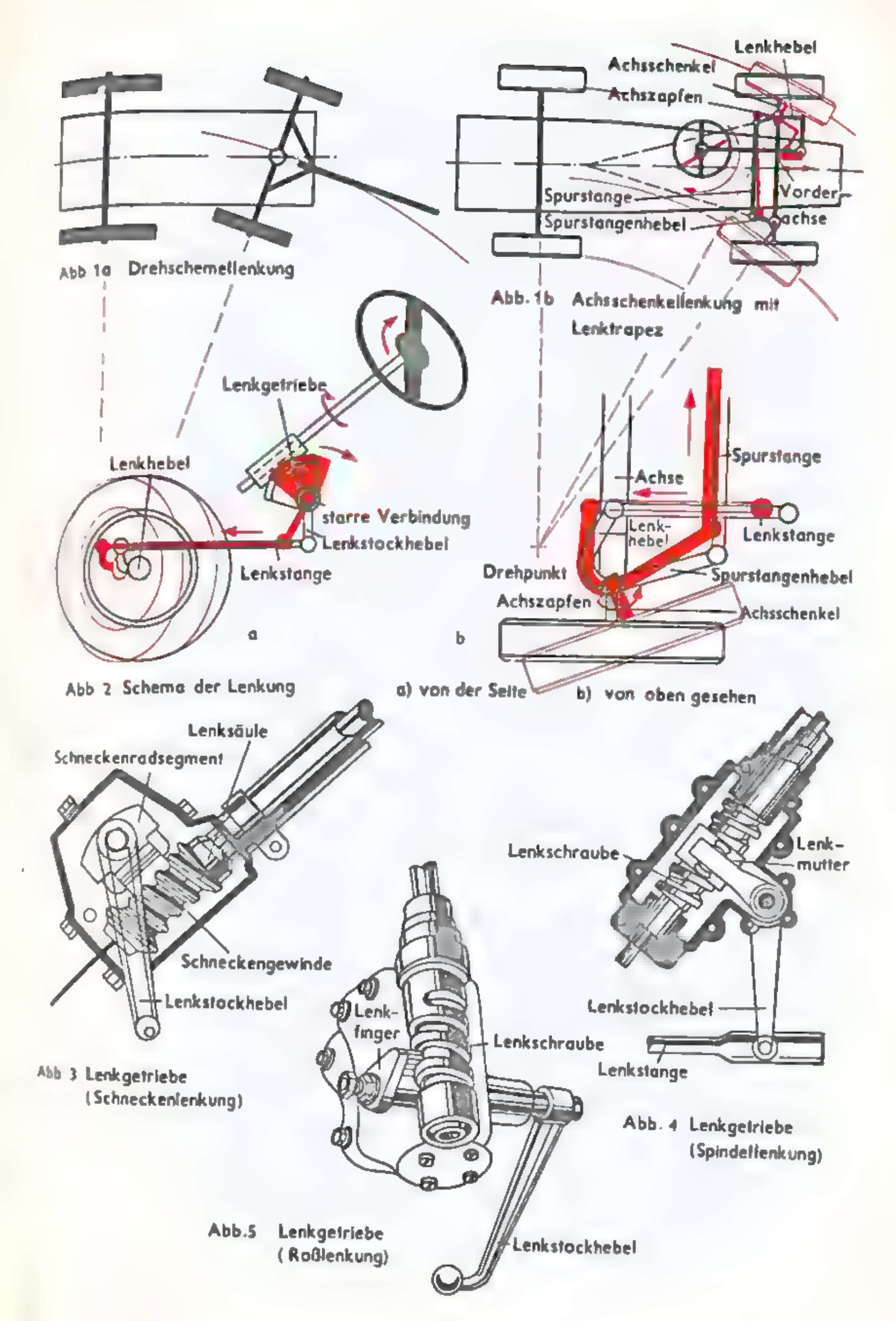


Abb 1a Drehschemellenkung

Abb. 1b Achsschenkellenkung mit Lenktrapez

Abb 2 Schema der Lenkung a) von der Seite b) von oben gesehen

Abb 3 Lenkgetriebe (Schneckenlenkung)

Abb. 4 Lenkgetriebe (Spindellenkung)

Abb.5 Lenkgetriebe (Roßlenkung)

LENKUNG II

Das auf Abb. 4, S. 487 dargestellte Lenkgetriebe mit Lenkmutter (Spindellenkung) läuft infolge der gleitenden Reibung zwischen Lenkschraube und Lenkmutter schwer und weist eine große Selbsthemmung auf. Dadurch ist ein einwandfreies Zurückdrehen der Lenkung aus der Kurvenfahrt in die Geradeausstellung nicht immer gewährleistet, und außerdem ist eine beträchtliche Lenkarbeit erforderlich. Diese Nachteile führten zur Entwicklung der Kugelumlauflenkung, die sich durch besondere Leichtgängigkeit und geringe Selbsthemmung auszeichnet. Aus der gleitenden Reibung ist durch Einfügen von Kugeln zwischen Muttergewinde und Lenkschraube rollende Reibung geworden (Abb. 6). Beim Drehen der Lenkschraube verschiebt sich die Lenkmutter. Dabei könnten Kugeln aus dem von der Lenkmutter und Lenkschraube gebildeten Kanal austreten, da die Kugellaufbahn zunächst offen ist (Abb. 7). Die Kugellaufbahn muß daher geschlossen werden, was z. B. durch ein Umlaufrohr geschehen kann, welches die beiden Enden der Kugellaufbahn in der Lenkmutter rechtzeitig so verbindet, daß die Kugeln nicht aus der Führung der Lenkmutter austreten können (Abb. 8). Die Kugeln gelangen dabei an das andere Ende der Lenkmutter und dort wieder in den, aus Gewindegang in der Lenkschraube und aus der Lenkmutter gebildeten Kugelkanal. Durch diese geschlossene Kugellaufbahn bilden die aneinandergereihten Kugeln eine endlose „Kette". Eine der üblichen Ausführungsformen der Kugelumlauflenkung zeigt Abb. 9. Hier ist die Lenkmutter mit zwei endlosen „Kugelketten" und dadurch mit zwei Kugelrückführrohren ausgestattet.
Das einfachste Lenkgetriebe in Aufbau und Ausführung stellt die Zahnstangenlenkung dar. Sie zeichnet sich durch guten Wirkungsgrad und genauen Kontakt zwischen dem Lenkrad in den Händen des Fahrers und den gelenkten Rädern aus. Das Zahnstangenlenkgetriebe besteht im wesentlichen aus einer Stange, die eine Verzahnung aufzuweisen hat. In die Verzahnung dieser Zahnstange greifen die Zähne eines Zahnrades ein. Dieses Zahnrad (Ritzel) ist mit der Lenksäule verbunden. Die Welle des Zahnrades ist drehbar, die Zahnstange dagegen ist verschiebbar gelagert. Durch Drehen des Zahnrades werden die Zahnstange und die damit verbundenen Spurstangen verschoben (Abb. 10). Die Zahnstange ist üblicherweise rund ausgeführt, so daß das rund ausgebohrte Lenkgehäuse gleichzeitig als Gleitlager der Zahnstange dient (Abb. 11). Ein Faltenbalg, der sich wie der Balg einer Ziehharmonika auslängen und verkürzen läßt, schützt den aus dem Lenkgehäuse austretenden Teil der Zahnstange vor Staub und Schmutz. An beiden Enden der Zahnstange ist die Spurstange über ein Kugelgelenk angeschlossen. Die Zahnstangenlenkung wirkt direkt; um Stöße und Erschütterungen von den Händen des Fahrers fernzuhalten, wird die Bewegung der Zahnstange durch ein Reibungselement gedämpft. Hierzu wird ein der Rundung der Zahnstange angepaßtes Kunststoffteil mittels einer Tellerfeder an die Zahnstange angepreßt.

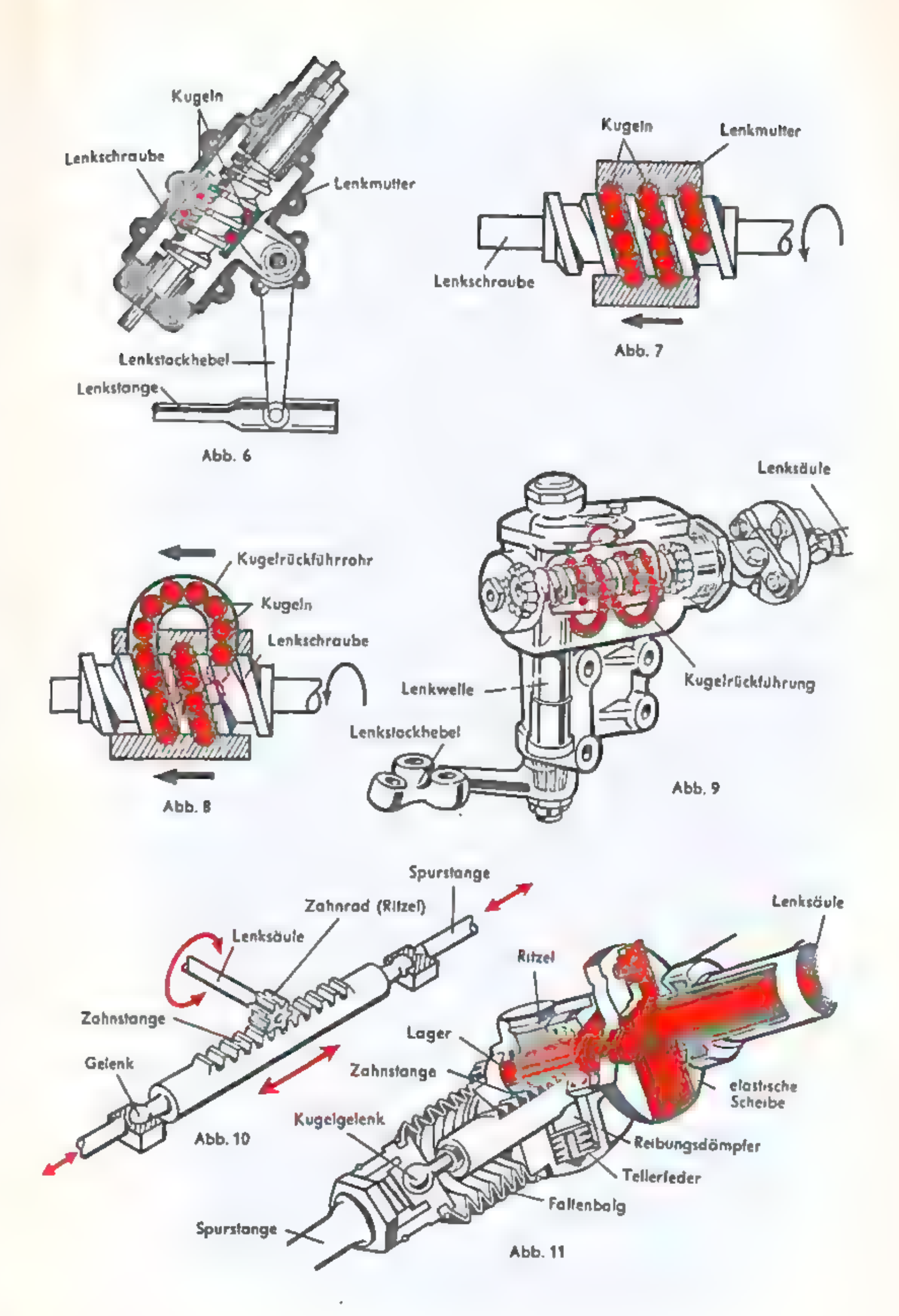


Abb. 6

Abb. 7

Abb. 8

Abb. 9

Abb. 10

Abb. 11

LENKUNG III

Die ungeteilte Spurstange (s. S. 487, Abb. 1b) kann nur bei einer starren Vorderachse angewendet werden. Dagegen weisen alle Vorderachsbauarten mit einzelner Radaufhängung geteilte Spurstangen auf, denn beim einseitigen Einfedern oder verschieden großem Anheben der Räder verändert sich bei dieser Achskonstruktion der Abstand der beiden Achsmittelpunkte und damit der Abstand zwischen den beiden Endpunkten der Lenkspurhebel (Abb. 12a). Dies führt bei der Verwendung einer ungeteilten Spurstange zum ungewollten Ausschwenken des nicht oder weniger stark angehobenen Rades und zum Bewegen des Lenkrades. Das Fahrzeug bleibt dabei nicht in der Spur und zeigt ein eigenwilliges Lenkverhalten. Dies kann durch Teilung der Spurstange vermieden werden. Bei der dreigeteilten Spurstange nach Abb. 12b stellen die beiden inneren Gelenke der Spurstange jeweils den Mittelpunkt eines Halbkreises dar, auf dem sich der Endpunkt des Lenkspurhebels der beiden Vorderräder bewegt. Diese einwandfreie Lenkgeometrie läßt sich (mit Ausnahme bei der Zahnstangenlenkung) nur durch einen Zwischenhebel erreichen (Abb. 13a). Das Lenkgetriebe und der Zwischenhebel sind so angeordnet, daß sie der Mittelpunkt einer kreisähnlichen Kurve sind, wie sie die Enden der Lenkspurhebel während des Durchfederns der Räder beschreiben. Die Zahnstangenlenkung stellt das Mittelteil einer dreigeteilten Spurstange dar (Abb. 13b). An beiden Enden der Zahnstangenlenkung ist jeweils gelenkig eine verstellbare Spurstange angeschlossen (Abb. 14a). Die Gelenke sind mit einem kugeligen Kopf versehen, der beweglich von zwei Halbschalen in einem Gehäuse, das zur Spurstange gehört, gehalten wird. Dabei preßt eine Feder die obere Halbschale spielfrei gegen den Kugelkopf. In letzter Zeit verwendet man für die Lagerung und Abdichtung der Kugelgelenke oft Kunststoff, weil dann das bei der Montage eingebrachte Schmiermittel für die ganze Lebensdauer dieses Fahrzeugteiles ausreicht. Das Gelenk muß nicht abgeschmiert werden, es ist wartungsfrei (Abb. 14b).

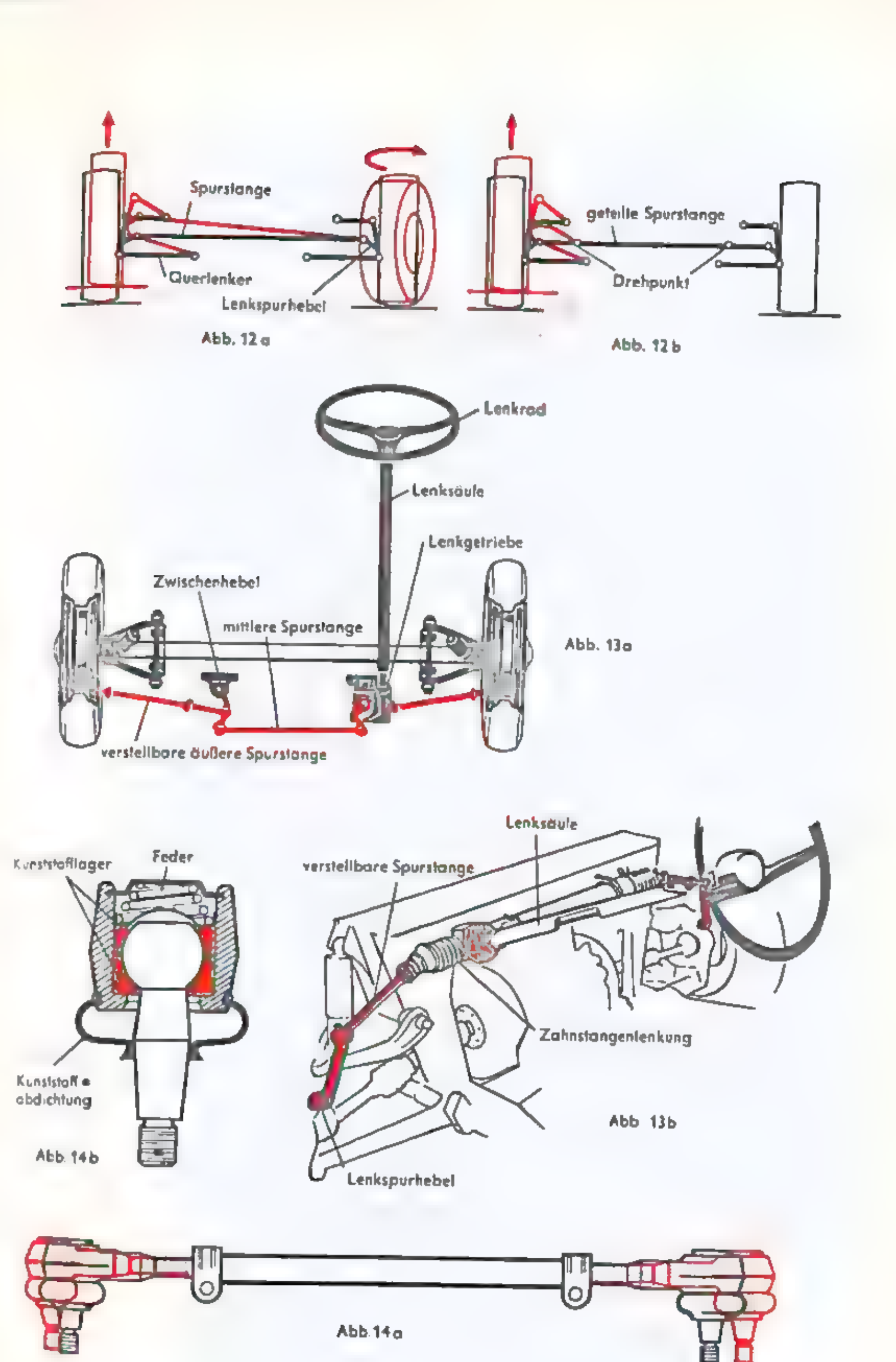


Abb. 12a

Abb. 12b

Abb. 13a

Abb. 14b

Abb. 13b

Abb. 14a

BREMSEN 1

Backenbremsen

In modernen Kraftfahrzeugen werden Innenbackenbremsen fast immer hydraulisch betätigt. Bei einer hydraulischen Anlage nutzt man ein Naturgesetz aus, nach dem der auf eine eingeschlossene Flüssigkeit ausgeübte Druck sich in dieser nach allen Richtungen gleichmäßig fortpflanzt (Abb. 1): Der linke Kolben belastet die Flüssigkeit mit 100 kp. Auf jeden der acht auf der rechten Seite dargestellten Kolben, von denen jeder einzelne die gleiche Kolbenfläche hat wie der linke, wirken ebenfalls je 100 kp. Der Kolbenweg der acht rechten Kolben beträgt je Kolben jedoch nur ein Achtel des Weges, den der linke Kolben zurücklegen muß. In Abb. 2 ist das Schema einer Innenbackenbremsanlage mit der gesamten Hydraulik dargestellt; sie besteht aus Hauptzylinder mit Ausgleichsbehälter, den Radzylindern und den verbindenden Rohrleitungen. Beim Bremsen spielen sich folgende Vorgänge ab: Durch Niederdrücken des Bremspedals wird im Hauptzylinder ein Kolben (der dem linken Kolben in Abb. 1 entspricht) bewegt; er erzeugt in dem ganzen Bremssystem einen Druck, durch den die beiden kleinen Kolben in den Radzylindern auseinandergepreßt werden. Über Druckbolzen werden die Bremsbacken an die Bremstrommel gedrückt (Abb. 3a und 3b). Die Bewegungsenergie des Fahrzeuges wird durch die an den Bremsbelägen auftretende Reibung in Wärmeenergie umgewandelt, die nach außen abgestrahlt wird; die Erwärmung der Bremstrommel ist nach längeren Bremswegen deutlich fühlbar. Damit eine möglichst große Wärmemenge in einer kurzen Zeit abgestrahlt werden kann, müssen die Bremstrommeln große äußere Flächen haben und an solchen Stellen am Fahrzeug angeordnet sein, an denen die Luft gut zutreten kann. Wird die Bremstrommel zu heiß, so dehnt sie sich zu stark aus, die Bremsbacken können sich wegen des begrenzten Weges im Druckzylinder nicht mehr so fest an deren Innenseite anpressen. Außerdem nimmt die Bremswirkung des Bremsbelages bei höherer Temperatur ab, da die entstehende Reibungskraft bei Erwärmung abnimmt. So wird durch schlechte Wärmeabfuhr die Wirksamkeit der Bremse stark herabgesetzt.

Kernstück der Bremsanlage ist der Hauptzylinder (Abb. 4). Wenn der Kolben nach Betätigung des Bremspedals bewegt wird, dann erzeugt er im Druckraum, indem er sich nach rechts bewegt, einen Überdruck. Dieser Druck wird über die Bremsleitungen den Radzylindern zugeführt. Damit eventuelle Druckdifferenzen in dem System ausgeglichen werden können (sie entstehen z. B. bei Ausdehnung der Bremsflüssigkeit in den Rohrleitungen), ist zwischen dem Druckraum und der Leitung ein Bodenventil angeordnet. Außerdem sorgt der Hauptzylinder für eine gleichmäßige Füllung, indem er bei Ruhestellung des Kolbens durch die Ausgleichsbohrung Bremsflüssigkeit in den Druckraum nachfließen läßt. Damit bei der Rückkehr des Kolbens in die Ruhestellung keine Luft angesaugt werden kann, ist die Hinterseite des Kolbens durch die Nachlaufbohrung mit Bremsflüssigkeit gefüllt. An einem Ende des Hauptzylinders sitzt auch noch der Bremslichtschalter, in welchem durch den Druck im Druckzylinder durch Verschieben eines kleinen Kolbens der elektrische Kontakt, der die Bremslichter aufleuchten läßt, betätigt wird.

Um den verschiedenen Anforderungen beim Bremsen zu genügen, gibt es verschiedene Bauarten der Innenbackenbremse.

Simplex-Bremse (Abb 5): Durch den hydraulischen Druck in einem Radzylinder werden beide Backen gegen die Bremstrommel gedrückt. Die Abstützkräfte werden unten an einem Lagerblock aufgenommen. Abb. 5a stellt eine Gliederbackenbremse, Abb. 5b eine Gleitbackenbremse dar. Die in Fahrtrichtung liegende Backe ist hier eine Auflaufbacke, bei der die Kraft, mit der sie an die Trommel gedrückt wird, durch Selbstverstärkung (Tangentialkräfte) größer ist als die aufgebrachte Spannungskraft.

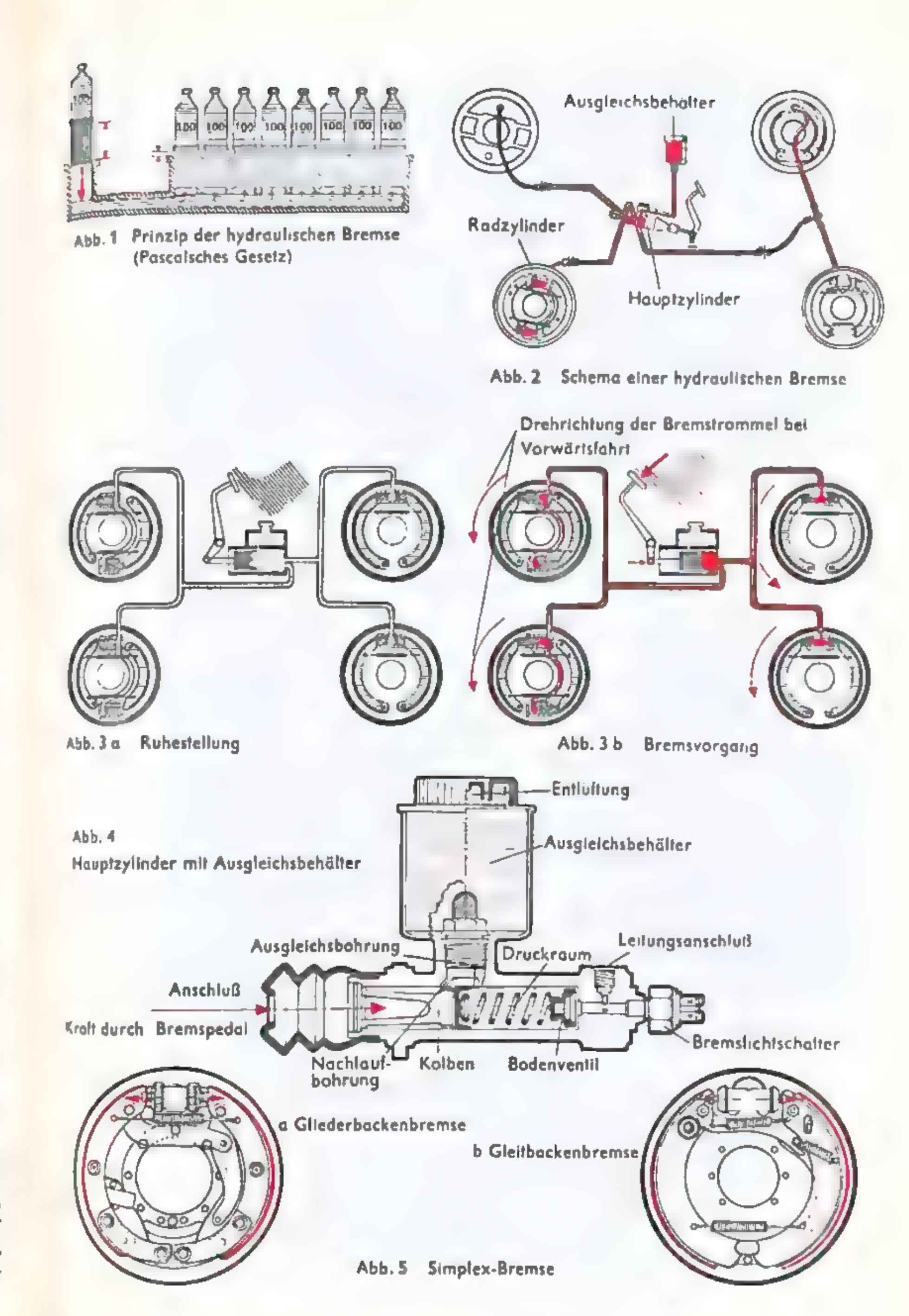


Abb. 1 Prinzip der hydraulischen Bremse (Pascalsches Gesetz)

Abb. 2 Schema einer hydraulischen Bremse

Abb. 3 a Ruhestellung

Abb. 3 b Bremsvorgang

Abb. 4 Hauptzylinder mit Ausgleichsbehälter

Abb. 5 Simplex-Bremse

BREMSEN II

Eine andere Ausführung der Innenbackenbremse ist die Duplex-Bremse (Abb. 6): Bei der Duplex-Bremse wird durch die Anordnung zweier auflaufender Bremsbacken eine hohe Ausnutzung der Selbstverstärkung erreicht. Jede Backe hat einen eigenen, nur nach einer Seite wirkenden Radzylinder, der eine Backe anpreßt und der anderen als Abstützung dient. Die Wirkung dieser Bremse ist beim Rückwärtsfahren sehr schlecht, weil dann nur ablaufende Backen vorhanden sind.
Weitere Bauarten sind die Duo-Duplex-Bremse und die Servo-Bremse, bei denen die Eigenschaften der beiden vorhergenannten miteinander kombiniert und noch weiter verstärkt sind.
Neben den bisher beschriebenen Einkreisanlagen baut man auch hydraulische Zweikreisanlagen mit Tandem-Hauptzylinder (Abb. 7). In diesem Tandem-Hauptzylinder befinden sich zwei Kolben, die durch das Bremspedal betätigt werden. Der vordere Kolben übermittelt seine Kraft auf den zweiten, wodurch zwei Kreise mit Bremsflüssigkeit unter Druck gesetzt werden. Der Vorteil der Zweikreisanlage liegt darin, daß bei Bruch einer Ölleitung eines Kreises der zweite Kreis wirksam bleibt.

Scheibenbremsen

Teilscheibenbremsen: Eine Scheibenbremse dieser Bauart nennt man auch Zangenbremse, denn hier ist die Bremsscheibe zwischen zwei zangenartig angeordneten Bremsbelägen eingespannt. Diese Beläge sind kreis- oder nierenförmig ausgebildet. Die Bremsscheibe läuft zum größten Teil außerhalb der Beläge und wird dadurch hervorragend gekühlt (Abb. 8a und 8b). Zweikreisanlagen wirken bei Teilscheibenbremsen nicht getrennt auf Vorder- oder Hinterräder, sondern jeder Kreis wirkt auf alle vier Räder. Zu diesem Zweck sind an den Bremsscheiben aller Räder je vier Bremszylinder angebracht (Abb. 9).
Vollscheibenbremsen (Abb. 10): Bei dieser Bauart wirken feststehende Beläge von innen her auf beide Seiten eines umlaufenden Gehäuses. Die entstehende Wärme muß dabei von innen her genau wie bei den Innenbackenbremsen durch das Gehäuse nach außen transportiert werden. Die Selbstverstärkung (Abb. 10b) wird hier durch Stahlkugeln erzeugt, die beim Verdrehen der beiden Bremsscheiben (eine fest, eine lose) gegeneinander auf Kugelpfannen mit schrägen Flächen auflaufen. Hierdurch werden die beiden Scheiben gespreizt und noch fester an das Gehäuse angedrückt. Die Größe der Selbstverstärkung ist von der Neigung der Kugelpfannen abhängig. Bei flacher Neigung der Kugelpfannen wird eine große Selbstverstärkung erzielt, jedoch kann eine derartige flache Kugelpfanne zum Klemmen und Blockieren der Bremse führen, da die Kugeln nicht mehr von selbst an die tiefste Stelle der Pfanne zurückrollen können. Außerdem müssen beide Scheiben eine große gegenseitige Verschiebung aufweisen, bevor sie so weit gespreizt sind, daß sie seitlich eine Bremswirkung ausüben können. Eine Abnutzung der Reibbeläge macht eine noch größere gegenseitige Verschiebung der Scheiben erforderlich, weshalb Bremsen mit großer Selbstverstärkung sehr empfindlich gegen Abnützung der Reibbeläge sind.
Die Bremskraft von Trommelbremsen wird selbsttätig durch den jeweils auflaufenden Bremsbacken erhöht (s. S. 492). Bei der Scheibenbremse ist eine Selbstverstärkung der Bremskraft nicht möglich. Daraus resultiert einerseits die saubere, stets gleichbleibend spureinhaltende Bremswirkung der Scheibenbremse, andererseits aber die gegenüber der Trommelbremse notwendige höhere Fußkraft. Da bei schweren Wagen die erforderliche Fußkraft sehr hoch werden würde, sind Geräte entwickelt worden, die die Bremskraft verstärken und die notwendige Fußkraft herabsetzen. Diese Geräte arbeiten auf Grund der Differenz des Luftdruckes zwischen Ansaugrohr (Unterdruck) und atmosphärischem Außendruck. Abb. 11 zeigt schematisch eine hydraulische Zweikreisbremsanlage mit Bremskraftverstärker.

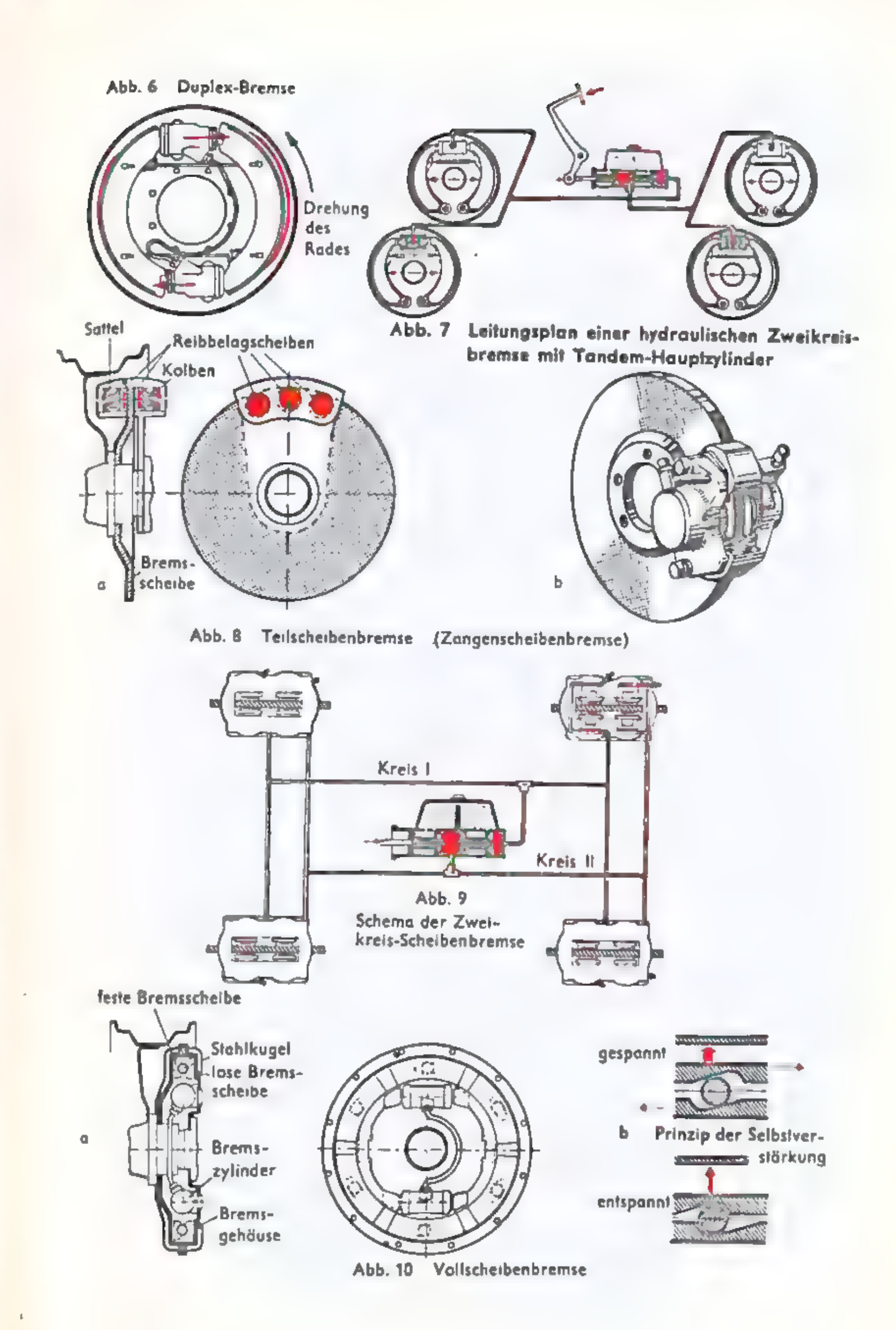


Abb. 6 Duplex-Bremse

Abb. 7 Leitungsplan einer hydraulischen Zweikreisbremse mit Tandem-Hauptzylinder

Abb. 8 Teilscheibenbremse (Zangenscheibenbremse)

Abb. 9 Schema der Zweikreis-Scheibenbremse

Abb. 10 Vollscheibenbremse

b Prinzip der Selbstverstärkung

BREMSEN III

Der Aufbau des Bremskraftverstärkers geht aus der Abb. 12 hervor: Der Bremsfußhebel (1) steht über Kolbenstange (2), Ventilkolben (10), elastische Reaktionsscheibe (12) und Stange (14) direkt mit den Kolben (18 und 19) des Zweikreis-Tandemhauptzylinders (20) in Verbindung. Wird die Bremse nicht betätigt, so befindet sie sich in Lösestellung. Dabei hat die Kolbenrückholfeder den Arbeitskolben (11) und das mit diesem starr verbundene Steuergehäuse (6) nach rechts in die gezeigte Ausgangsstellung gedrückt. Gleichzeitig hält die Druckfeder (3) den Ventilkolben und die damit verbundene Kolbenstange rechts im Steuergehäuse. Die Dichtfläche des Ventilkolbens liegt dichtend an dem Tellerventil (8) auf. Dadurch ist der Durchlaß für die Außenluft verschlossen, dagegen der Vakuumkanal (9) geöffnet, der die linke und rechte Seite des beweglichen Arbeitskolbens verbindet. Daher herrscht auf beiden Seiten des Arbeitskolbens der gleiche Unterdruck, denn über den Vakuumanschluß (17) ist das Gerät mittels eines druckfesten Schlauches mit dem Ansaugrohr des Motors verbunden. Der laufende Motor saugt eventuell vorhandene Luft ab. Die Druckfedern (22) und (23) halten die Kolben (18 und 19) in ihrer Ausgangsstellung. Wird durch Niedertreten des Bremsfußhebels die Bremse betätigt, so bewegen sich zunächst die Kolbenstange und der damit verbundene Ventilkolben, um das bei der Lösestellung vorhandene Spiel zwischen Ventilkolben (10) und Reaktionsscheibe (12), entgegen der Druckfeder (3) nach links (Abb. 13). Die Ventildruckfeder (4) preßt dabei das elastische Tellerventil (8) gegen die Dichtflächen des Steuergehäuses (6) einerseits und des Ventilkolbens (10) andererseits. Die Verbindung zwischen dem Vakuumkanal (9) und der Steuerbohrung (7) und damit zwischen der linken und rechten Seite des Arbeitskolbens (11) ist unterbrochen. Wird der Bremsfußhebel weiter durchgetreten (Abb. 14), so spricht die Bremse an, denn die Kolbenstange (2) wandert weiter nach links, wodurch sich der Ventilkolben (10) in die elastische Reaktionsscheibe (12) eindrückt. Dadurch hebt die Dichtfläche des Ventilkolbens (10) von dem elastischen Tellerventil (8) ab. Die atmosphärische Außenluft durchströmt den Ringraum zwischen Steuergehäuse und Tellerventil (8) und gelangt über die Steuerbohrung (7) in den rechten Teil des Arbeitskolbens (11). Der dort herrschende Unterdruck wird durch die zuströmende Luft langsam abgebaut. Die Abdichtung zwischen Steuergehäuse und Tellerventil verhindert, daß Luft durch den Vakuumkanal zur linken Seite des Arbeitskolbens gelangt. Dadurch herrscht auf der rechten Seite des Arbeitskolbens ein höherer Druck als links. Dieser Druckunterschied wirkt auf die Fläche des Arbeitskolbens ein. Daraus ergibt sich eine Hilfskraft, die verstärkend in gleicher Richtung wie die Pedalkraft wirkt. Kolbenstange (2), Ventilkolben (10), Steuergehäuse (6) mit Arbeitskolben (11), Stange (14) mit den Kolben (18 und 19) werden entgegen der Kraft der Rückholfedern (13), (22) und (23) und des hydraulischen Systems nach links verschoben. Die Kolben (18 und 19) verdrängen die im Hauptbremszylinder eingeschlossene Bremsflüssigkeit (vgl. auch S. 492). Die Bremsen des Bremskreises 1 und 2 sprechen an. Ist der Bremsfußhebel nicht ganz durchgetreten und wird dadurch nicht voll gebremst, so verschiebt sich zunächst das Steuergehäuse (6) in Folge des auf den Arbeitskolben (11) wirkenden Druckunterschiedes weiter nach links und erhöht damit den Flüssigkeitsdruck im Bremssystem. Dabei überholt das Steuergehäuse den Ventilkolben (10), dessen Dichtfläche sich an das Tellerventil (8) anlegt (Abb. 15). Der Zugang der Außenluft zur rechten Seite des Arbeitskolbens (11) ist unterbrochen und der Arbeitskolben und das damit verbundene Steuergehäuse bleiben stehen. Der auf die Bremshydraulik ausgeübte Druck erhöht sich nicht weiter. Bei der Vollbremsung werden die Kolbenstange (2) und der Ventilkolben (10) soweit nach links verschoben, daß der Ventilkolben nicht vom Steuergehäuse (6) überholt werden kann. Damit strömt die Außenluft solange in den rechten Teil des Arbeitskolbens (11) ein, bis das Vakuum ganz aufgehoben ist und dort der Druck der Außenluft herrscht. Der Druckunterschied beiderseits des Arbeitskolbens ist am größten und die Hilfskraft am stärksten geworden.

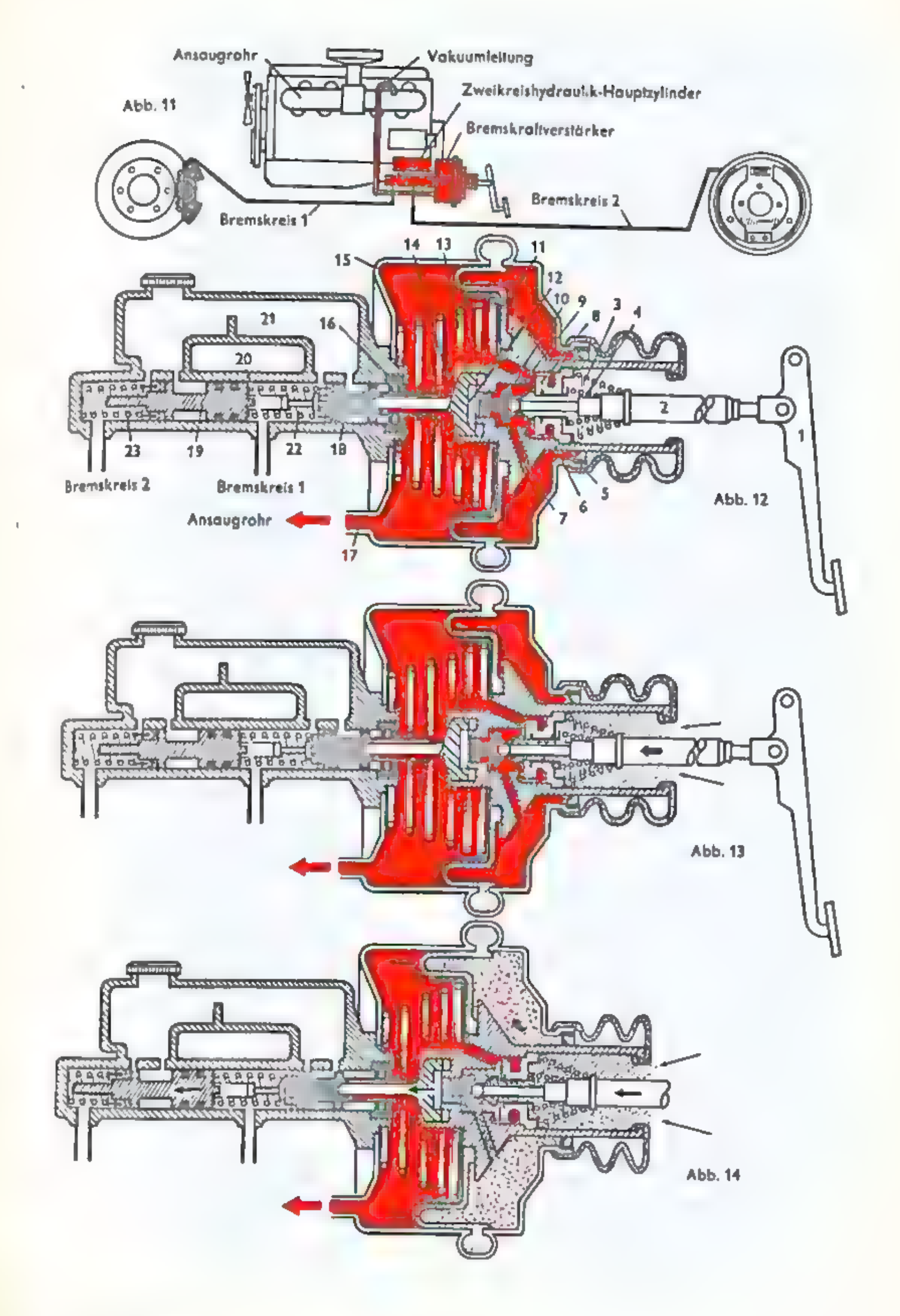


Abb. 11

Abb. 12

Abb. 13

Abb. 14

Beim Zurücknehmen des Bremsfußhebels wandert die Kolbenstange nach rechts und der Ventilkolben (10) preßt sich mit seiner Dichtfläche auf das Tellerventil (8), das dadurch von der Dichtfläche des Steuergehäuses abhebt. Der Ventilkolben (10) ist in seine Ausgangsstellung zurückgekehrt. Der Zugang der Außenluft ist verschlossen, die Verbindung zwischen beiden Seiten des Arbeitskolbens über den Vakuumkanal geöffnet. Dadurch gleicht sich der Druck links und rechts des Kolbens aus, und die Druckfedern schieben die Kolben nach rechts in ihre Ausgangslage zurück. Der Bremsvorgang ist beendet. Der Motor saugt die eingetretene Luft ab, bis sich im Gerät der ursprüngliche Unterdruck wieder eingestellt hat.

Die Verteilung der Bremskraft auf die Vorder- und Hinterachse ist konstruktiv festgelegt und normalerweise unveränderlich. Dies führt häufig wegen der unterschiedlichen Belastung der Vorder- und Hinterachse zum Überbremsen einer der Achsen und damit zur Beeinträchtigung der Lenkfähigkeit oder zum Schleudern des Fahrzeuges. Es sind daher Geräte entwickelt worden, die die Bremskraftverteilung am Kraftfahrzeug beeinflussen. Das einfachste Gerät ist das Druckbegrenzungsventil, das nach Erreichen eines bestimmten hydraulischen Druckes im Bremssystem einen weiteren Anstieg des Druckes in den Radbremszylindern der Hinterachse verhindert und damit weitgehend die Gefahr des Blockierens der Hinterräder ausschaltet (Abb. 16). Das Schaltorgan ist ein Stufenkolben. Die Kraft, die auf den Stufenkolben einwirkt, ist von der Flächendifferenz des Stufenkolbens, von dem hydraulischen Druck auf diese Flächen und von der Federkraft abhängig. Übersteigt die durch den hydraulischen Druck auf die große Fläche erzeugte Kraft die Kraft, die sich durch den hydraulischen Druck auf die kleine Fläche und durch die Federspannung ergibt, so schließt der Stufenkolben. Er öffnet erst wieder, wenn der Druck vor dem Druckbegrenzer so weit abgesunken ist, daß die auf die große Fläche wirkende Schließkraft geringer ist als die Öffnungskraft, die sich durch den Druck der eingesperrten Bremsflüssigkeit der Hinterachse auf die kleinere Fläche des Stufenkolbens und aus der gespannten Feder ergibt.

Bei dem Druckminderer mit Umschaltpunkt steigt der Hinterradbremsdruck ab einem durch eine Feder bestimmten Bremsdruck noch weiter an, jedoch weniger steil als bisher (Abb. 17). Der vom Hauptbremszylinder erzeugte hydraulische Druck gelangt über den Anschluß (1) in den aus Zylinder (3) und Stufenkolben (4) gebildeten Ringraum (2), durch die Bohrungen (5) im Stufenkolben (4), über das Ventil (6) zum Raum (7) und von dort aus über den Anschluß (8) zu den Bremszylindern der Hinterachse (Abb. 18a). Ist der Umschaltdruck erreicht, so übersteigt die auf die große Fläche des Stufenkolbens (4) wirkende Druckkraft die entgegenwirkende Kraft, die durch die vorgespannte Feder (9) und durch den hydraulischen Druck auf die kleinere Ringfläche des Stufenkolbens (4) erzeugt wird, so daß sich der Stufenkolben nach rechts verschiebt. Das Ventil (6) schließt (Abb. 18b). Steigt der Druck im Hauptbremszylinder weiter an, so überwiegt die Federkraft und die auf die kleine Ringfläche wirkende Druckkraft. Der Stufenkolben (4) wird so lange nach links bewegt, bis die auf den Stufenkolben drückenden Kräfte wieder im Gleichgewicht sind. Dabei stellt sich in Raum (7) und damit in den Bremszylindern der Hinterräder immer ein geringerer Druck als im Hauptbremszylinder und im Ringraum (2) ein. Sinkt nach Beendigung des Bremsvorganges der Druck im Hauptbremszylinder, so öffnet der im Raum (7) herrschende Überdruck das Ventil (6). Der Druck gleicht sich aus und die vorgespannte Feder (9) schiebt den Stufenkolben nach links bis zum Anschlag (Abb. 18a). Die Vorspannung der Feder (9) kann bei einer anderen Ausführung in Abhängigkeit der Einfederung der Hinterachse und damit in Abhängigkeit von der Hinterachsbelastung mittels eines Hebelwerkes verändert werden. Diese Bauart arbeitet als lastabhängiger Bremsdruckregler.

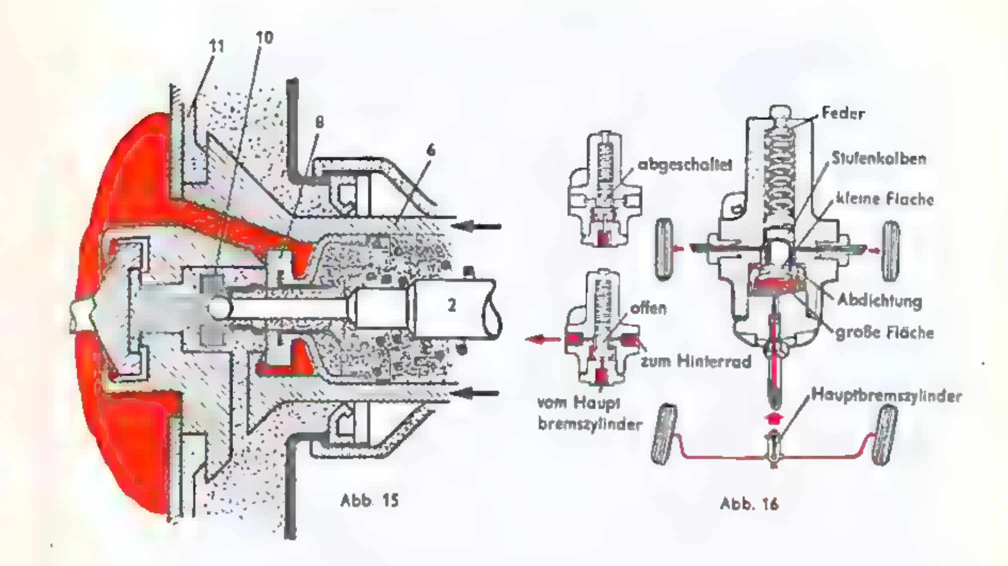


Abb. 15

Abb. 16

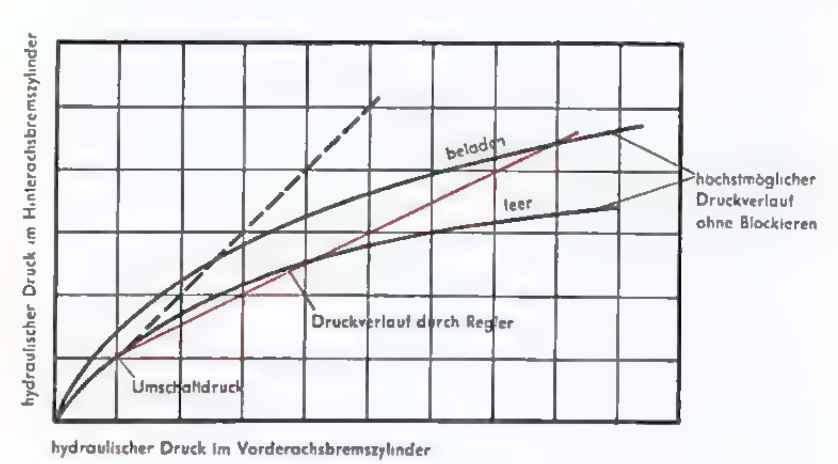


Abb. 17

8 3 2 1 9 10 7 6 5 4

Abb. 18a

große Fläche
kleine Ringfläche
7 6 2 4

Abb. 18b

KUPPLUNG I

Verbrennungsmotoren müssen eine gewisse Mindestdrehzahl (etwa 300–600 U/min) haben, bevor sie von selbst laufen und ein zum Antrieb des Fahrzeuges genügend großes Drehmoment abgeben. Beim Stillstand des Fahrzeuges ist es erforderlich, den laufenden Motor mit Hilfe der Kupplung vom Getriebe zu trennen (Abb. 1). Beim Anfahren muß die Kupplung die zunächst stillstehende Eingangswelle ins Getriebe allmählich auf die Drehzahl der Motorwelle bringen, wobei sie unter mehr und mehr abnehmendem Schlupf (Drehzahlunterschied zwischen Motorwelle und Getriebeeingangswelle) ein Drehmoment (S. 20ff.) übertragen muß. Sofern das Getriebe (s. S. 504) formschlüssige Schaltelemente besitzt, wird auch zum Schalten der Gänge, d.h. zur Veränderung der Getriebeübersetzung, das kurzzeitige Trennen des Motors vom Getriebe mit Hilfe der Kupplung erforderlich.
In der gebräuchlichsten Kupplung wird die Verbindung der Motorwelle mit der Getriebewelle durch Reibung zweier oder mehrerer Scheiben aufeinander hergestellt. Der beim Angleichen der beiden Drehzahlen auftretende Schlupf (das „Schleifen" der Kupplung) führt zur Wärmeentwicklung. Diese ist beim normalen Kupplungsvorgang nicht gravierend; schleift die Kupplung jedoch längere Zeit, so führen die Schleifwirkungen sehr schnell zur Zerstörung des Kupplungsbelages.
Meistens werden heute trockene Einscheibenkupplungen verwendet. Bei diesen Konstruktionen ist eine Mitnehmerscheibe aus Stahlblech, die beiderseits aufgenietete, segmentförmige Kupplungsbeläge trägt, auf der Kupplungswelle drehfest, aber axial verschiebbar angeordnet (Abb. 2). Die Kupplungswelle ist gleichzeitig die Abtriebswelle der Kupplung zum Getriebe. Die Mitnehmerscheibe wird durch Druckfedern zwischen die Schwungscheibe und den Kupplungsring gedrückt. Dieser Kupplungsring ist axial verschiebbar angebracht, ist aber durch Mitnehmer so mit dem Gehäuse verbunden, daß er die Drehbewegung des Gehäuses jederzeit mitmachen muß. Am Kupplungsring greift der Ausrückhebel an, der mit seinem anderen Ende durch die verschiebbare Ausrückmuffe bewegt wird. Beim Ausrücken der Kupplung schiebt sich die Ausrückmuffe auf den Motor zu, wodurch die Ausrückhebel den Kupplungsring gegen die Federkraft der Druckfedern abheben: Die Verbindung zwischen Motor und Getriebe ist unterbrochen.
Aus der Einscheibenkupplung ist die Mehrscheibenkupplung hervorgegangen (Abb. 3). Auch hier ist die Kupplung in das Motorschwungrad eingebaut. In diesem Gehäuse liegen die Antriebslamellen – drehfest mit dem Gehäuse verbunden, aber axial verschiebbar –, die einen Kupplungsbelag tragen. Die Abtriebslamellen sind am Druckteller befestigt, auf den auch die Andruckfeder wirkt. Der Druckteller sitzt direkt, aber zum Ausrücken der Kupplung axial verschiebbar (Abb. 3b), auf der Abtriebswelle.

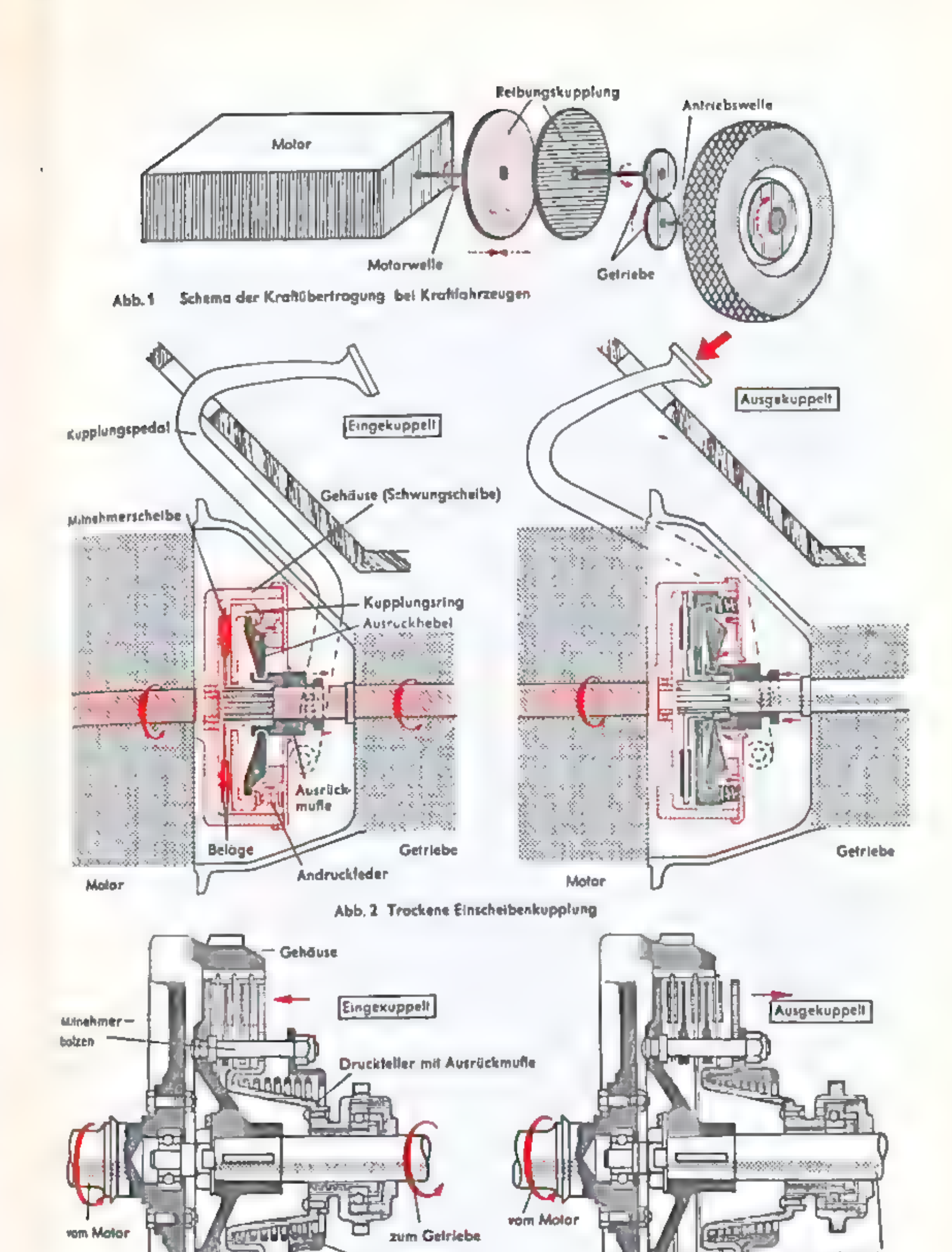


Abb. 1 Schema der Kraftübertragung bei Kraftfahrzeugen

Abb. 2 Trockene Einscheibenkupplung

Abb. 3 Trockene Mehrscheiben-(Lamellen-)Kupplung

KUPPLUNG II

Ein völlig ruckfreies Anfahren ermöglicht die Strömungskupplung. Bei ihr wird ein von der Antriebswelle erzeugter Flüssigkeitsstrom benutzt, die Abtriebswelle mitzunehmen und auf gleiche Drehzahl wie die Antriebswelle zu bringen. Ihr Prinzip geht aus Abb. 1 hervor: In einem in sich geschlossenen Flüssigkeitskreislauf wird vom Motor das Schaufelrad einer Kreiselpumpe angetrieben, der entstehende Flüssigkeitsstrom wird durch das Schaufelrad einer Turbine (spiegelbildliche Umkehr der Kreiselpumpe) geleitet, so daß jetzt an der Welle der Turbine (Abtriebswelle) Drehenergie abgenommen werden kann, beide Wellen also hydraulisch miteinander gekuppelt sind. Bei den heutigen Flüssigkeitskupplungen (Abb. 2) sitzen die beiden Schaufelräder, das der Pumpe und das der Turbine, in einem gemeinsamen Gehäuse. Jedes der beiden Räder besitzt einen Halbringraum, der durch eine große Anzahl meist radial verlaufender Rippen (Schaufeln) in eine ebenso große Zahl einzelner sektorförmiger Kammern aufgeteilt ist. Das Pumpenrad (Antriebsteil) und das Turbinenrad (Abtriebsteil) sind abgesehen von der manchmal etwas verschieden großen Kammerzahl spiegelbildlich zueinander gebaut. Beide Räder stehen sich mit engem Spalt gegenüber. Das Kupplungsgehäuse und die Innenräume der Schaufelräder sind mit einer Flüssigkeit, meist Öl, gefüllt. Das Öl darf nicht schäumen und soll möglichst gleichbleibende Viskosität (Fließverhalten) bei allen vorkommenden Temperaturen aufweisen. In der Abb. 3 ist das Gehäuse zum besseren Einblick in die Kupplung weggelassen. Außerdem sind zur Verdeutlichung der Wirkungsweise beide Schaufelräder in Achsrichtung auseinandergezogen. Wird das Pumpenrad vom Motor angetrieben, so wird das in seinen Kammern befindliche Öl bei der Drehung mitgenommen. Die dadurch am Öl wirksame Fliehkraft schiebt das Öl in den Kammern des Pumpenrades nach außen. Da das Turbinenrad augenblicklich noch in Ruhe ist, sind an den Ölteilchen in dessen Kammern noch keine Fliehkräfte wirksam. Dadurch kann das im Pumpenrad von innen nach außen drängende Öl außen in das Turbinenrad eintreten und in Wellennähe aus dem Turbinenrad neues Öl in das Pumpenrad ansaugen, so daß der in Abb. 3 eingezeichnete Strömungskreislauf entsteht. Da aber dem Öl durch die Mitnahme im Pumpenrad auch in der Drehrichtung der Antriebswelle eine Geschwindigkeit (Umfangsgeschwindigkeit) erteilt wird, entsteht beim Übertritt des Öls in die Kammern des noch stillstehenden Turbinenrades ein Druck auf die in Drehrichtung des Pumpenrades liegende Kammerwand, so daß das Turbinenrad allmählich mitgenommen wird. Damit werden jetzt auch am Ölstrom im Turbinenrad Fliehkräfte wirksam. Solange aber die Drehzahl des Pumpenrades größer ist als die des Turbinenrades, ist auch die Fliehkraft im Pumpenrad größer als im Turbinenrad, so daß die eingezeichnete Strömungsrichtung des Öls, wenn auch mit verlangsamter Strömungsgeschwindigkeit, erhalten bleibt. Hat sich die Drehzahl der Abtriebswelle jedoch an die der Antriebswelle angeglichen, so ist der Druck des Öls in beiden Rädern nach außen gleich groß: Der Flüssigkeitsstrom kommt zum Stillstand. Beide Wellen sind in diesem Zustand hydraulisch gekuppelt. Je stärker der Flüssigkeitsstrom in beiden Rädern ist, um so größer ist auch die Rückwirkung des einen auf das andere, bzw. das übertragbare Drehmoment. Es ist am größten bei laufendem Pumpen- und stillstehendem Turbinenrad, am kleinsten, wenn beide Räder gleiche Drehzahl haben, oder anders ausgedrückt: Eine entsprechend große Drehmomentübertragung ist nur bei entsprechend großem Schlupf zwischen beiden Rädern möglich. Das größte Drehmoment kann jedoch nie größer als das vom Motor abgegebene sein. Bei der Bergabfahrt und weggenommenem Gas kehrt sich die Wirkung der beiden Räder um: Das Turbinenrad wird zum Pumpenrad und umgekehrt. Dadurch ist es möglich, das Fahrzeug mit dem Motor über die Strömungskupplung abzubremsen. Mit der Strömungskupplung ist auch ein „Abwürgen" des Motors beim Gaswegnehmen und/oder Abbremsen der Fahrzeugräder nicht möglich, da ja dann der gleiche Zustand eintritt wie vor dem Anfahren.

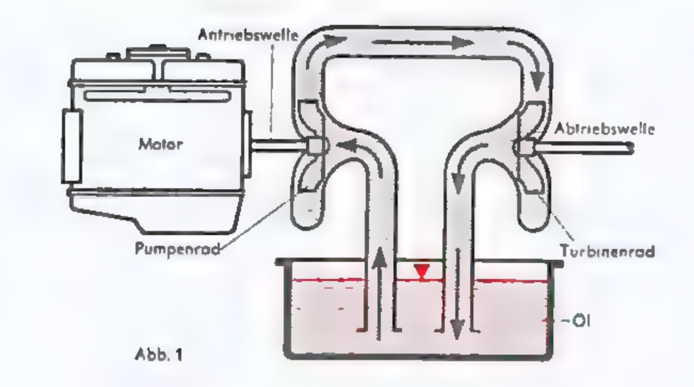


Abb. 1

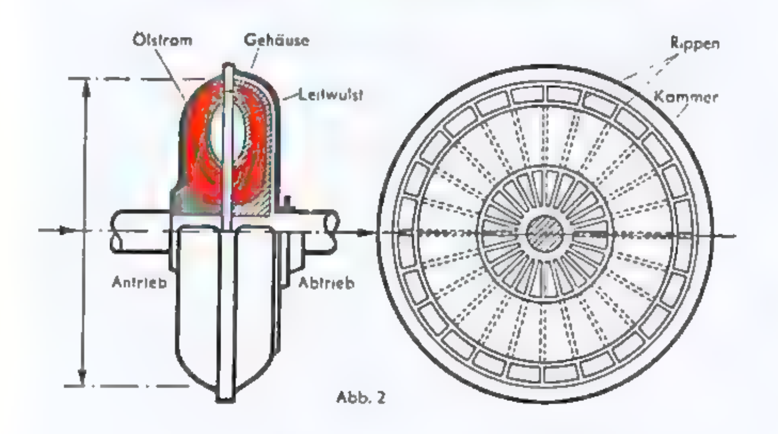


Abb. 2

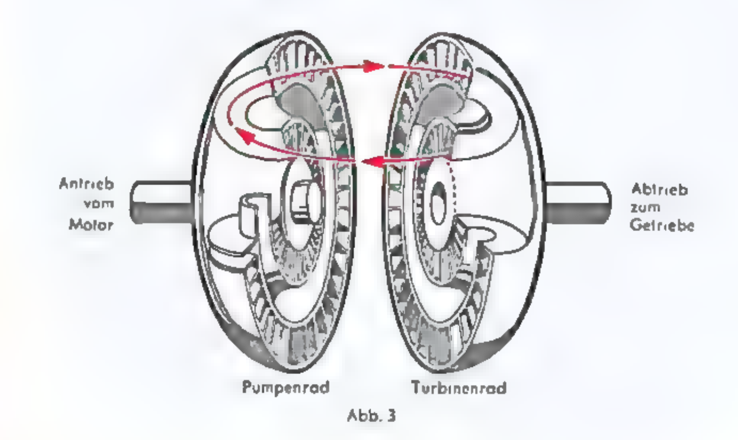


Abb. 3

WECHSELGETRIEBE

Die bei Kraftfahrzeugen allgemein verwendeten Verbrennungsmotoren geben ihre Leistung meist bei hohen Drehzahlen ab (etwa 4000 bis 6000 Umdrehungen pro Minute). Dies zwingt zu einer Herabsetzung der Drehzahl zwischen Kurbelwelle und Antriebswelle der Triebräder. Da außerdem das vom Motor abgegebene Drehmoment (s. u.) nur in geringen Grenzen veränderlich ist, muß das Übersetzungsverhältnis beim Fahrbetrieb veränderlich sein, damit die an den Rädern wirksam werdenden Antriebskräfte den verschiedenen Fahrwiderständen angepaßt werden konnen.
Im Achsantrieb der Kraftfahrzeuge ist ein Teil der erforderlichen Gesamtübersetzung untergebracht. Die übrige erforderliche wechselnde Übersetzung kann mit dem Wechselgetriebe eingestellt werden. Außerdem ermöglicht das zwischen Kupplung (s. S. 500) und Achsantrieb eingebaute Wechselgetriebe die Rückwärtsfahrt. Da das Wechselgetriebe durch die eingeschalteten Zahnradübersetzungen das Drehmoment verändert, wirkt es als sogenannter Drehmomentwandler. Das Übersetzungsverhältnis ist abhängig von dem Größenverhältnis der beiden im Eingriff befindlichen Zahnräder: Ein Zahnrad, das sich auf einer Welle mit einer bestimmten Drehzahl dreht, treibt eine andere Welle, auf der ein halb so großes Zahnrad befestigt ist, mit doppelter Drehzahl an. Da die Zahnradkräfte an beiden Zahnrädern gleich groß sind, ist das Drehmoment, das Produkt aus der tangential an einer Welle angreifenden Kraft und deren Abstand von der Drehachse der Welle, am halb so großen Zahnrad nur halb so groß wie am anderen. Dafür läuft aber dieses Rad mit doppelter Drehzahl. Sieht man von der Reibung ab, so wird bei einem Zahnradpaar, das miteinander im Eingriff steht, am kleineren Rad die höhere Drehzahl, dafür aber das niedrigere Drehmoment vorhanden sein; das größere Rad läuft langsamer, überträgt aber das größere Drehmoment. Das Übersetzungsverhältnis ist das Verhältnis der Eingangsdrehzahl zur Ausgangsdrehzahl; in umgekehrtem Verhältnis stehen die Teilkreisdurchmesser der Zahnräder und die Drehmomente der Wellen.
Ein Wechselgetriebe besteht normalerweise aus dem antreibenden Wellenstumpf (Antriebswelle), der Vorgelegewelle und der Abtriebswelle (Abb. 1), die parallel zur Fahrzeugachse im Getriebegehäuse liegen. Auf dem Wellenstumpf, der in das Gehäuse ragt, ist ein Zahnrad fest aufgekeilt. Es wird direkt vom Motor über die Kupplung angetrieben, dreht sich also mit Motordrehzahl. Dieses Zahnrad treibt ein zweites, etwas größeres an, das auf der im Gehäuse drehbar angebrachten Vorgelegewelle sitzt, wodurch die Vorgelegewelle mit einer kleineren Drehzahl als der Motordrehzahl läuft. Auf dieser Vorgelegewelle sind die Übersetzungsräder für die kleinen Gänge (1., 2. und 3. Gang beim Vierganggetriebe oder 1. und 2. Gang beim Dreiganggetriebe) fest angebracht. Die sogenannte Abtriebswelle des Getriebes, also diejenige Welle, welche die gewünschte Drehzahl auf den Achsenantrieb überträgt, liegt in Verlängerung des antreibenden Wellenstumpfes. Auf ihr sind die den einzelnen Gängen entsprechenden Abtriebsräder verschiebbar angeordnet; die Vorgelegewelle läuft immer mit. Beim 1. Gang (Abb. 1) treibt ein kleines Zahnrad auf der Vorgelegewelle ein großes Zahnrad auf der Abtriebswelle an. Im zweiten Gang (Abb. 2) treibt ein größeres Zahnrad auf der Vorgelegewelle ein nur wenig größeres auf der Abtriebswelle an – die Drehzahl der Hinterräder ist etwas größer als im 1. Gang. Bei Getrieben mit 4 Gängen erzeugt ein drittes Zahnradpaar auf Vorgelege- und Abtriebswelle die Übersetzung für den 3. Gang. Beim sogenannten großen oder direkten Gang (Abb. 3) wird die Drehzahl des Motors ohne Untersetzung durch das Getriebe hindurchgeleitet. Beim Rückwärtsgang wird die Umdrehungsrichtung der Abtriebswelle durch Zwischenschaltung eines weiteren Zahnrades umgekehrt (Abb. 4). Bei manchen Wechseltrieben besteht zusätzlich noch die Moglichkeit, durch ein großes Zahnrad auf der Vorgelegewelle und ein kleines Zahnrad auf der Abtriebswelle die Abtriebsdrehzahl größer als die Motordrehzahl zu machen. Dies bedeutet, daß trotz hoher Fahrgeschwindigkeit der Motor nur mit verhältnismäßig niedriger Drehzahl zu laufen braucht. Man nennt diesen Gang Schnellgang oder Schongang.

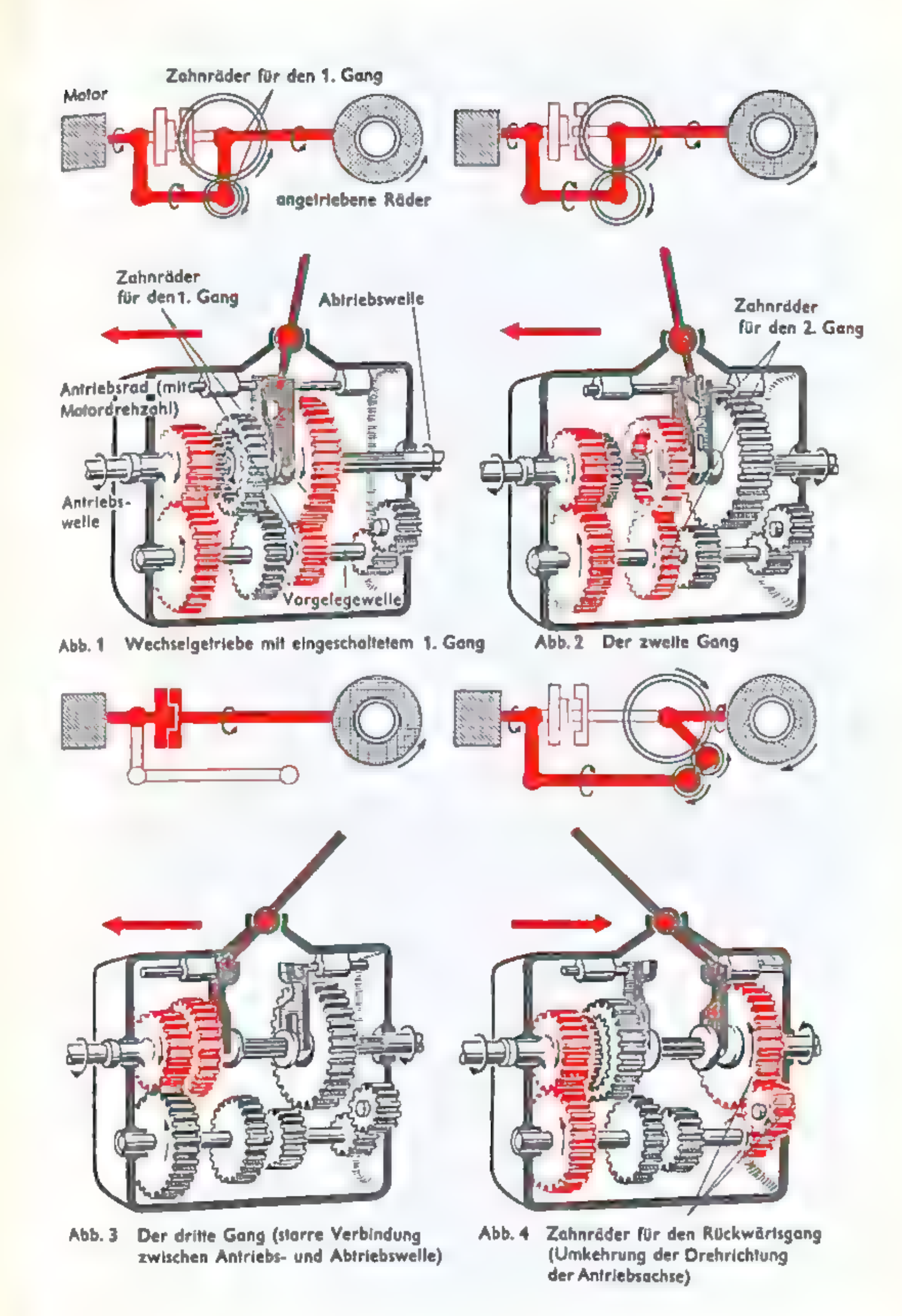


Abb. 1 Wechselgetriebe mit eingeschaltetem 1. Gang

Abb. 2 Der zweite Gang

Abb. 3 Der dritte Gang (starre Verbindung zwischen Antriebs- und Abtriebswelle)

Abb. 4 Zahnräder für den Rückwärtsgang (Umkehrung der Drehrichtung der Antriebsachse)

SYNCHRONGETRIEBE

Der grundlegende Unterschied zwischen dem nicht synchronisierten Schalt- oder Wechselgetriebe und dem Synchrongetriebe (Abb. 1 und 4) besteht darin, daß bei ersterem beim Schalten der einzelnen Gänge Zahnräder durch Verschieben erst in Eingriff gebracht werden, während bei letzterem stets alle Zahnradpaare dauernd im Eingriff sind. Die verschiedenen Übersetzungen werden erst durch Verschieben von Schaltmuffen zur Wirkung gebracht. Da bei Synchrongetrieben ein Verschieben der Zahnräder gegeneinander nicht erforderlich ist, können ihre Zähne, um einen möglichst geräuscharmen Lauf zu erzielen, spiralig oder schräg verzahnt sein. Bei den einzelnen Zahnradpaaren ist z. B. das eine Rad drehfest mit der Vorgelegewelle verbunden, während sich das andere Rad auf der Hauptwelle lose drehen kann. Zum Einschalten eines Ganges wird das lose Rad des betreffenden Zahnradpaares durch Klauen auf der Welle drehfest gemacht. Diese Klauen befinden sich einerseits auf der Innenseite eines Ringes, des Klauenringes (Schiebemuffe), andererseits an dem einzuschaltenden Zahnrad. Der Klauenring sitzt axial verschiebbar, aber drehfest auf der Hauptwelle des Getriebes. Bevor aber die Klauen den starren Kraftschluß herbeiführen können, müssen der mit Hauptwellendrehzahl laufende Ring und das mit anderer Drehzahl laufende, einzuschaltende Zahnrad auf gleiche Drehzahl gebracht (synchronisiert) werden. Dies geschieht durch kleine Konus- oder Lamellenkupplungen. Bei Konuskupplungen ist dem einzuschaltenden Zahnrad ein kegelförmiger Vorsprung vorgebaut, der sich in eine kegelförmige Eindrehung der Schaltmuffe, auf welcher der Klauenring sitzt, einschiebt. Lamellenkupplungen bestehen aus kleinen Scheiben um die Welle, die durch den Anpreßdruck der Schaltmuffe beim Schalten zusammengepreßt werden und dadurch die beiden sich zunächst verschieden schnell drehenden Teile durch Abbremsen oder auch Beschleunigen des einen Teils gegenüber dem anderen zum Gleichlauf bringen.

Beim Einschalten eines Ganges wird der Klauenring (Abb. 2) in Richtung auf das einzuschaltende Zahnrad bewegt (Abb. 3). Dabei treten die oben beschriebenen Kupplungen in Aktion und bringen die beiden Teile auf gleiche Drehzahl. Dann kann der Klauenring weiter vorrücken und sich über die Mitnehmerklauen des Zahnrades ziehen, genau so, als wenn beide Teile stillständen. Die drehfeste Verbindung von der antreibenden Welle zum übersetzenden Zahnrad ist somit hergestellt. In der Praxis spürt man beim Einschalten des neuen Ganges zuerst einen Widerstand, der so lange auftritt, wie sich die beiden Teile noch hinsichtlich ihrer Drehzahl angleichen. Erst nach Beendigung dieses Vorganges kann die Schiebemuffe in ihre Endstellung gebracht und damit der Gang endgültig eingeschaltet werden.

Im Automobilbau werden verschiedene Arten von Synchronisierungen gebaut, die prinzipiell mit der geschilderten Art übereinstimmen, die sich jedoch durch verschiedene Vorrichtungen (z. B. Sperrsynchronisation) voneinander unterscheiden.

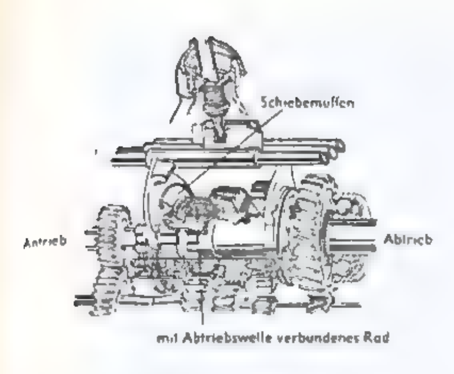


Abb. 1 Synchronisiertes Viergangetriebe (eingeschaltet der 3. Gang)

Kupplungsklauen Sperrkugel Klauenring kegelige Reibflächen

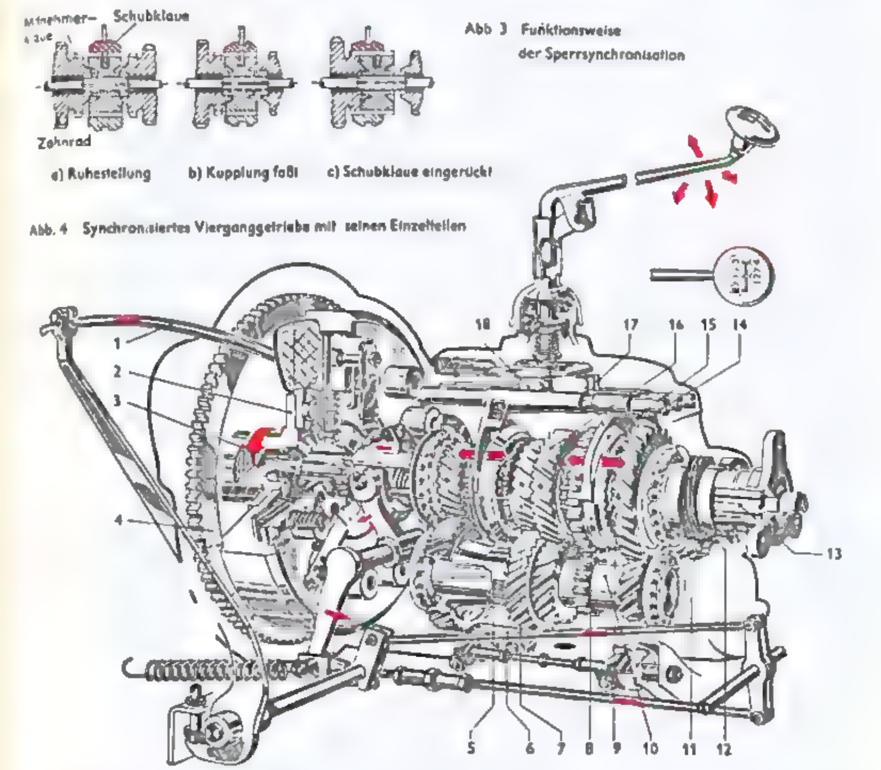
Abb. 2 Sperrsynchronisierung (Konuskupplung)

Mitnehmer-klaue Schubklaue Zahnrad

a) Ruhestellung b) Kupplung faßt c) Schubklaue eingerückt

Abb. 3 Funktionsweise der Sperrsynchronisation

Abb. 4 Synchronisiertes Vierganggetriebe mit seinen Einzelteilen

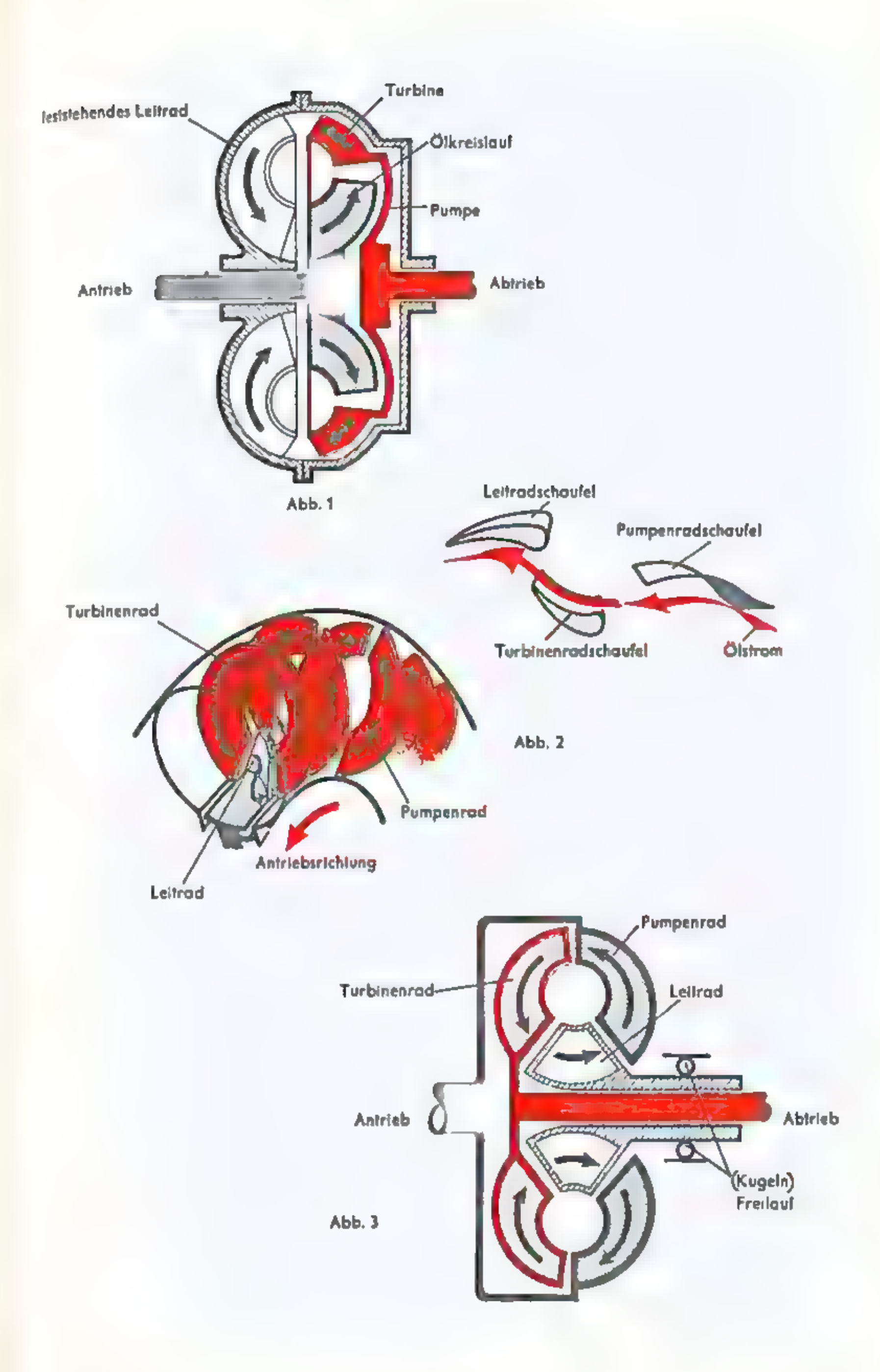


1 Kupplungsfußhebel 2 Kurbelwelle 3 Antriebswelle 4 Anlaßzahnkranz 5 Schiebemuffe 3. und 4. Gang 6 Synchronkegel (Gleichlaufkegel) 7 Schraubenrad 3. Gang 8 Schiebemuffe 1. und 2. Gang 9 Schraubenrad 1. Gang 10 Vorgelegewelle 11 Antriebskleinrad (Tachometerantrieb) 12 Schraubenrad 13 Hauptwelle 14 Schaltstangen 15 Schaltgabel 1. und 2. Gang 16 Schraubenrad 2. Gang 17 Schaltkopf (Rückwärtsgang) 18 Schaltgabel 3. und 4. Gang

AUTOMATISCHES GETRIEBE I

Automatische Getriebe arbeiten selbsttätig. Entsprechend der jeweiligen Fahrgeschwindigkeit und Belastung schalten sie den dafür vorgesehenen Gang ein. Fahrzeuge mit Getriebeautomaten sind am fehlenden Kupplungspedal erkennbar. Nach dem Wählen der gewünschten Fahrstellung (z.B.: D bedeutet Drive = Normalfahrt, L bedeutet Low = Berggang) mittels Wählhebel oder Druckknopf wird nur noch Gas gegeben oder gebremst. Das Getriebe schaltet dann von selbst, abhängig von der Belastung in den höheren oder niedrigeren Gang. Der Fahrer kann mit starkem Durchtreten des Gaspedals (Kickdown) die Fahrgeschwindigkeit, bei der von einem in den anderen Gang umgeschaltet wird, höher legen, d.h. es wird dadurch erst später hoch- und schon früher abwärts geschaltet, was z.B. zum raschen Beschleunigen vorteilhaft ist. Zum Anhalten allgemein wird nur das Gas weggenommen und gebremst. Die Stellung D kann dabei gewählt bleiben. Wird wieder Gas gegeben, so erfolgt das Anfahren. Soll dies vermieden werden, so trennt die Stellung N (= Neutral) den Motor von den Antriebsrädern (z.B. für das Warmlaufenlassen des Motors bei erhöhter Drehzahl im Stand). Für das Parken (Stellung P) bleibt jedoch der Motor über das Getriebe mit den Antriebsrädern verbunden, so daß das Fahrzeug bei abgestelltem Motor auch am Hang trotz gelöster Bremse nicht wegrollen kann. Die Stellung R ist für die Rückwärtsfahrt. Getriebe mit selektiver Automatik können durch Wählen einer Zahl so beeinflußt werden, daß sie nur bis zum entsprechenden Gang hochschalten (z.B. bei Wahl der 2 bis zum 2. Gang). Das Getriebe schaltet dann selbsttätig diesen und die niederen Gänge, sofern Belastung und Fahrgeschwindigkeit oder Kickdown dies erfordern. Die höheren Gänge (im Beispiel der 3. und 4. Gang) sind dann gesperrt, was z.B. bei Bergabfahrt vorteilhaft sein kann.

Die selbsttätige Anfahrkupplung ist meist eine Föttingerkupplung (s. Strömungskupplung S. 502). Bei Verwendung eines Föttingerwandlers (Strömungswandler, Abb. 1) als Drehmomentenwandler kann die Anfahrkupplung entfallen, da dieser deren Aufgaben mit übernehmen kann. Ein Vergleich des Strömungswandlers der Abb. 1 mit der Strömungskuppl. S. 502 zeigt, daß dieser außer dem Pumpenrad auf der Antriebswelle und dem Turbinenrad auf der Abtriebswelle noch ein weiteres Rad, das feststehende Leitrad, aufweist. Nur durch dieses ist überhaupt eine Drehmomentenvergrößerung an der Abtriebswelle möglich. Außerdem fällt auf, daß sämtliche Räder beim Drehmomentenwandler gekrümmte Schaufeln besitzen (Abb. 2). Wie bei der Strömungskupplung wird bei Antrieb des Pumpenrades das Öl auf eine Kreisbahn mitgenommen, so daß die dann an jedem Ölteilchen entstehende Fliehkraft dieses nach außen ins Turbinenrad und von dort weiter ins Leitrad drückt. Da aber die Schaufeln des feststehenden Leitrades umgekehrt wie die der beiden anderen Räder gekrümmt sind, wird der aus dem Turbinenrad austretende Ölstrom an diesen Schaufeln stark umgelenkt, wodurch eine Rückwirkung auf das Turbinenrad eintritt. Die „Abstützung" des Ölstroms am Leitrad bewirkt eine Vergrößerung des an das Turbinenrad abgegebenen Drehmomentes auf das Zwei- bis Zweieinhalbfache des in das Pumpenrad geleiteten Antriebsmomentes, wobei sich gleichzeitig eine Verringerung der Drehzahl des Turbinenrades gegenüber der des Pumpenrades ergibt. Je kleiner beim Fahrbetrieb das an der Abtriebswelle geforderte Drehmoment ist, um so mehr erhöht sich die Drehzahl der Abtriebswelle. Dies geschieht so lange, bis Antriebs- und Abtriebswelle gleiche Drehzahl haben. Da aber jetzt das feststehende Leitrad als störendes Hindernis im Ölstrom wirkt, ist es vielfach mit einem Freilauf versehen (Abb. 3), der es in Drehrichtung der anderen beiden Räder freigibt und es mit diesen umlaufen läßt, sobald kein Abstützungsmoment am Leitrad nötig ist. Damit wird bei gleicher Größe der Drehmomente an der Antriebs- und an der Abtriebswelle der Strömungswandler zur Strömungskupplung (Trilokprinzip).



AUTOMATISCHES GETRIEBE II

Weitere in Getriebeautomaten verwendete Bauelemente sind Planetengetriebe. Dies sind Umlaufgetriebe, deren Zahnräder dauernd in Eingriff sind. Das Schalten und damit die Wahl einer anderen Übersetzung erfolgt bei dieser Getriebeart durch wahlweises Festhalten der einzelnen Bauteile des Umlaufgetriebes. Abb. 1 zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines derartigen Getriebes. Wie die Planeten um die Sonne können im Planetengetriebe die Planetenräder um ein zentrales Sonnenrad kreisen. Die Planetenräder sind mit ihren Achsen in einem Planetenradträger (auch Steg genannt) gelagert, der sich ebenfalls drehen kann. Außen kämmen die Planetenräder mit der Innenverzahnung eines Hohlrades, das sich selbst auch wieder drehen kann. In der Abb. 1 ist rechts deutlich sichtbar, daß das Hohlrad auf einer Hohlwelle sitzt, durch deren Bohrung die Welle, mit der der Planetenträger verbunden ist, nach rechts geht. Wie bereits oben erwähnt, ergeben sich die einzelnen Getriebeübersetzungen zwischen Antriebs- und Abtriebswelle durch Festhalten des Teiles, das nicht gerade An- oder Abtriebswelle ist. Meist geschieht das durch Öldruck, mit dem Bremsbänder oder Lamellen betätigt werden. Da das Planetengetriebe insgesamt drei Wellen aufweist, nämlich die Welle 1, auf der das Sonnenrad sitzt, die Welle 2, die mit dem Planetenradträger verbunden ist, und die Welle 3, die das Hohlrad trägt, gibt es drei mögliche Antriebswellen. Da dann jeweils eine der beiden noch freien Wellen festgehalten werden kann, während die freie dritte Welle zur Abtriebswelle wird, gibt es $3 \times 2 = 6$ Übersetzungsmöglichkeiten im Planetengetriebe. Dazu kommt die Möglichkeit der Verblockung des ganzen Getriebes, so daß die Drehzahl der Antriebswelle gleich der der Abtriebswelle ist, also als siebente „Übersetzung" der direkte Gang entsteht. Von diesen sieben Möglichkeiten werden meist in den Planetengetrieben nur jeweils zwei ausgenutzt, da ja üblicherweise eine Vertauschung von Antriebs- und Abtriebswelle nur sehr schwer möglich ist. Von den sieben Übersetzungsmöglichkeiten seien vier herausgegriffen, da sie bei den nachfolgend besprochenen Getrieben eine Rolle spielen. Im ersten Fall (Abb. 2a) soll das Sonnenrad angetrieben und das Hohlrad festgehalten sein. Es drehen sich dann der Planetenträger und die damit verbundene Abtriebswelle in gleicher Richtung. Die Planetenräder wälzen sich dabei im Hohlrad ab, so daß sich der Planetenträger und damit die Abtriebswelle langsamer drehen als das angetriebene Sonnenrad. Im zweiten Fall (Abb. 2b) soll wieder das Sonnenrad angetrieben, aber jetzt der Planetenradträger festgehalten sein. Da jetzt die Achsen der Planetenräder am gleichen Ort bleiben, drehen sich diese gegensinnig zum angetriebenen Sonnenrad und nehmen das Hohlrad und die damit verbundene Abtriebswelle ebenfalls gegensinnig zum Sonnenrad mit. Man erhält dadurch einen Rückwärtsgang. Im dritten Fall (Abb. 2c) wird das Hohlrad angetrieben, das Sonnenrad festgehalten. Jetzt wälzen sich die Planetenräder auf dem Sonnenrad ab und drehen den Planetenradträger und die damit verbundene Abtriebswelle in die gleiche Richtung wie das Hohlrad, wobei die Drehzahl des Planetenradträgers bzw. der Abtriebswelle kleiner ist als die des angetriebenen Hohlrades. Im vierten Fall (Abb. 2d) sollen Hohlrad und Sonnenrad mit gleicher Drehzahl angetrieben sein. Der gesamte Planetensatz wird dadurch mitgenommen, so daß das Getriebe gleichsam als ein verblocktes Ganzes umläuft: Antriebs- und Abtriebswelle haben dann die gleiche Drehzahl, was dem direkten Gang entspricht.

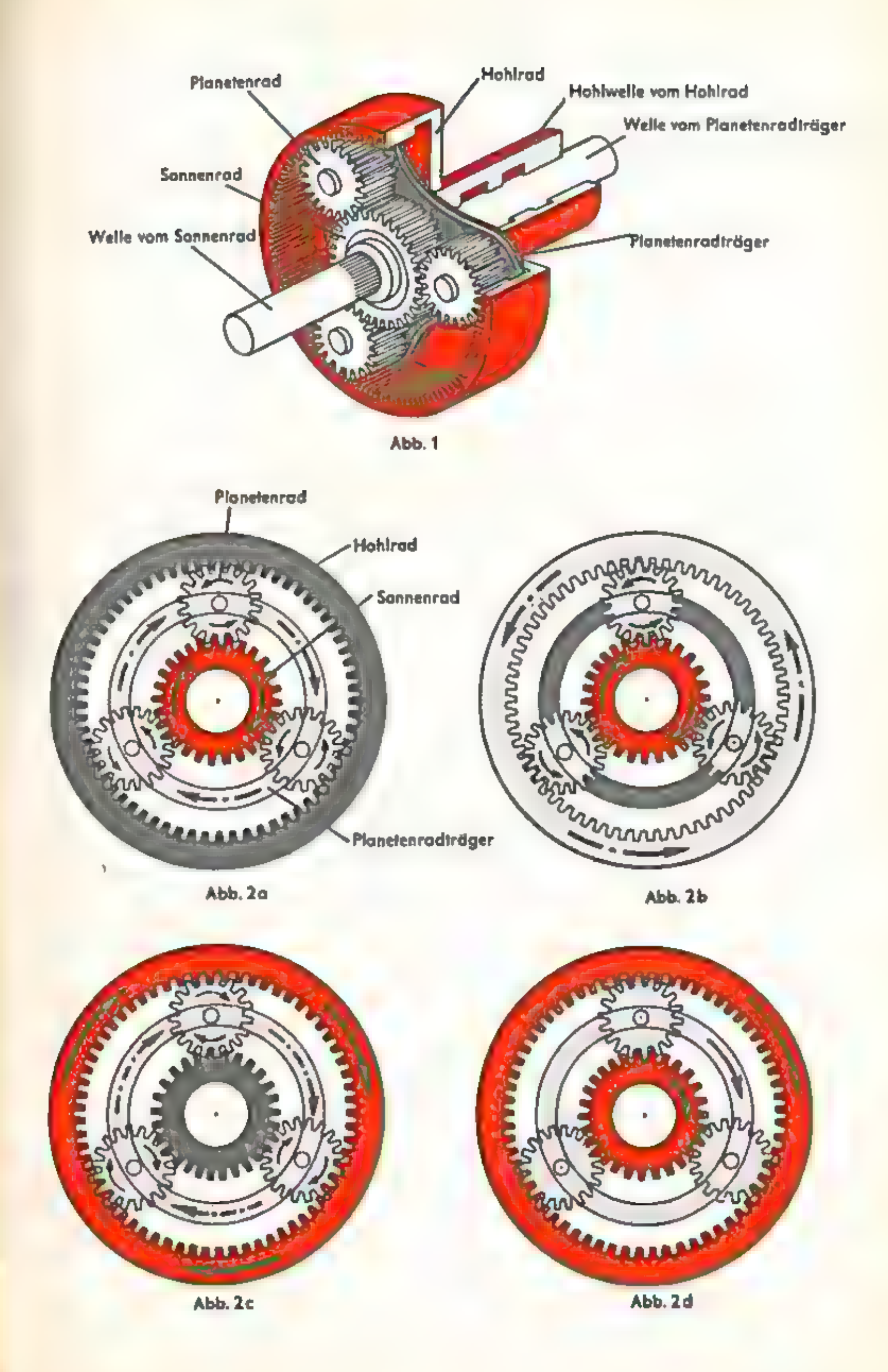


Abb. 1

Abb. 2a

Abb. 2b

Abb. 2c

Abb. 2d

AUTOMATISCHES GETRIEBE III

Ein automatisches Getriebe mit einer Strömungskupplung zum Anfahren (s. S. 502) zeigt die Abb. 1. Die Übersetzungen für vier Vorwärtsgänge und einen Rückwärtsgang werden in zwei Planetenradsätzen durch wahlweises Festhalten oder Verblokken ihrer Glieder hergestellt. Zum Festhalten und Verblocken dienen die Bremsbänder B 1, B 2 und B 3 sowie die Kupplungen K 1, K 2 und K 3. In der Abb. 1 ist der Kraftfluß für den 1. Gang eingezeichnet. Hier treibt der Motor das mit seinem Schwungrad verbundene Pumpenrad (P) der Strömungskupplung an, wodurch das Turbinenrad (T) mitgenommen wird. Vom Turbinenrad wird das Sonnenrad des ersten Planetenradsatzes angetrieben. Da dessen Hohlrad durch das Bremsband B 1 festgehalten wird, erfolgt gleichsinnige, aber verlangsamte Mitnahme des Planetenradträgers (s. Abb. 2a, S. 511). Dieser treibt die Zwischenwelle und das damit verbundene Hohlrad des zweiten Planetenradsatzes an. Hier hält das Bremsband B 2 das Sonnenrad fest, so daß der Planetenradträger gleichsinnig, aber weiter untersetzt mitgenommen wird (s. Abb. 2c, S. 511). Die Abtriebswelle des Getriebes erhält daher im 1. Gang eine, gegenüber der Antriebswelle zweimal herabgesetzte Drehzahl. Für den 2. Gang bleibt das Bremsband B 1 angezogen. Statt des Bremsbandes B 2 wird die Kupplung K 2 betätigt, wodurch der zweite Planetensatz verblockt ist. Im 3. Gang bleibt, wie im 1. Gang, das Bremsband B 2 angezogen, dafür wird der erste Planetenradsatz durch Betätigen der Kupplung K 1 verblockt. Im 3. Gang untersetzt also nur der zweite Planetenradsatz. Im 4. Gang werden die Kupplungen K 1 und K 2 betätigt und damit beide Planetensätze verblockt. Es wird dann keine Untersetzung hergestellt. Antriebs-, Zwischen- und Abtriebswelle laufen mit der Motordrehzahl. Beim Rückwärtsgang (Abb. 2) werden durch Anziehen des Bremsbandes B 3 der Planetenradträger des ersten Planetensatzes und gleichzeitig das über die Zwischenwelle damit verbundene Hohlrad des zweiten Planetensatzes festgehalten. Da gleichzeitig die betätigte Kupplung K 3 das Hohlrad des ersten Satzes mit dem Sonnenrad des zweiten Satzes verbindet, geht der Kraftfluß vom angetriebenen Sonnenrad des ersten Satzes über dessen Planetenräder auf dessen Hohlrad. Dieses treibt über die Zwischenwelle das Sonnenrad des zweiten Satzes und über den Planetenradträger die Abtriebswelle an. Im ersten Satz wird hier die notwendige Gegenläufigkeit (s. Abb. 2b, S. 511) für den Rückwärtsgang erzeugt. Das Getriebe der Abb. 3 zeigt einen Strömungswandler, der nach dem Trilokprinzip arbeitet (s. S. 508), und einen doppelten Planetensatz. Der Strömungswandler erfüllt die Aufgaben der Anfahrkupplung und außerdem eine stufenlose Wandlung des Drehmomentes. Der nachgeschaltete doppelte Planetensatz, dessen Übersetzungen von der Automatik eingestellt werden, sorgt dafür, daß der Strömungswandler trotz starker Herabsetzung der Getriebeausgangsdrehzahl immer in dem Drehzahlbereich arbeiten kann, für den der Wandler ausgelegt ist, und in dem er die geringsten Strömungsverluste aufweist. Die beiden Planetenradsätze zeigen hier noch eine Besonderheit: Sie besitzen einen gemeinsamen Planetenradträger, in dem die beiden verschiedenen Sätze Planetenräder miteinander kämmen. Während jeder Planetenradsatz in je einem Sonnenrad kämmt, ist nur ein Planetenradsatz mit dem mit der Abtriebswelle verbundenen (einzigen!) Hohlrad in Eingriff. Die Kupplung K 1 ist in allen Vorwärtsgängen betätigt, so daß dann immer das hintere Sonnenrad angetrieben ist. Im 1. Gang hält B 2 den gemeinsamen Steg fest, wodurch über die beiden Planetenradsätze das auf der Abtriebswelle sitzende Hohlrad angetrieben wird. Im 2. Gang hält B 1 das vordere Sonnenrad fest. Die vom hinteren Sonnenrad angetriebenen Planetenräder nehmen den Steg mit. Da sich die eine Planetenradsorte aber auf dem vorderen feststehenden Sonnenrad abwälzen muß, wird auch eine Drehung des Hohlrades und damit der Abtriebswelle hervorgerufen. Im 3. Gang sind K 1 und K 2 betätigt und damit beide Sonnenräder mit gleicher Drehzahl angetrieben. Dies ergibt Verblockung aller Räder und damit gleiche Drehzahl an der Abtriebswelle.

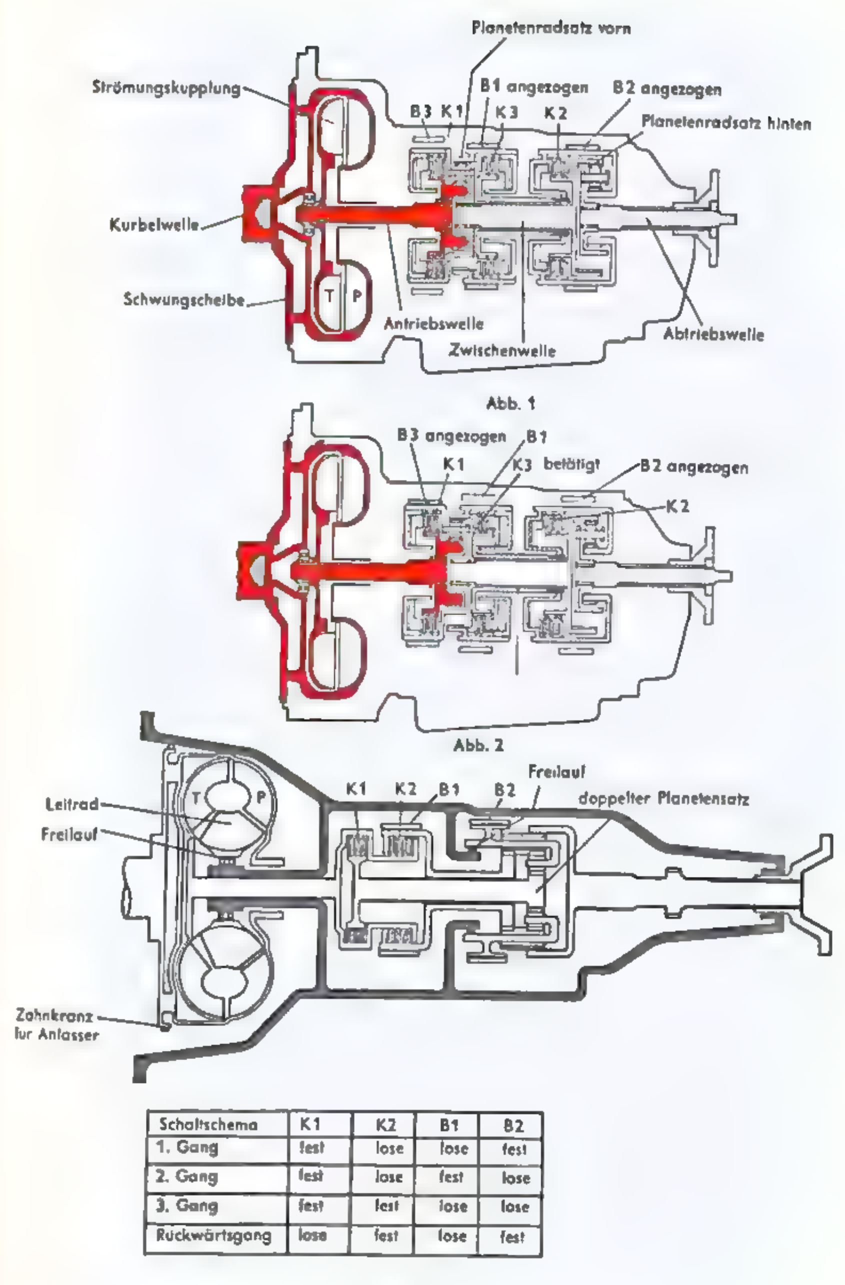


Abb. 1

Abb. 2

Schaltschema	K1	K2	B1	B2
1. Gang	fest	lose	lose	fest
2. Gang	fest	lose	fest	lose
3. Gang	fest	fest	lose	lose
Rückwärtsgang	lose	fest	lose	fest

Abb. 3

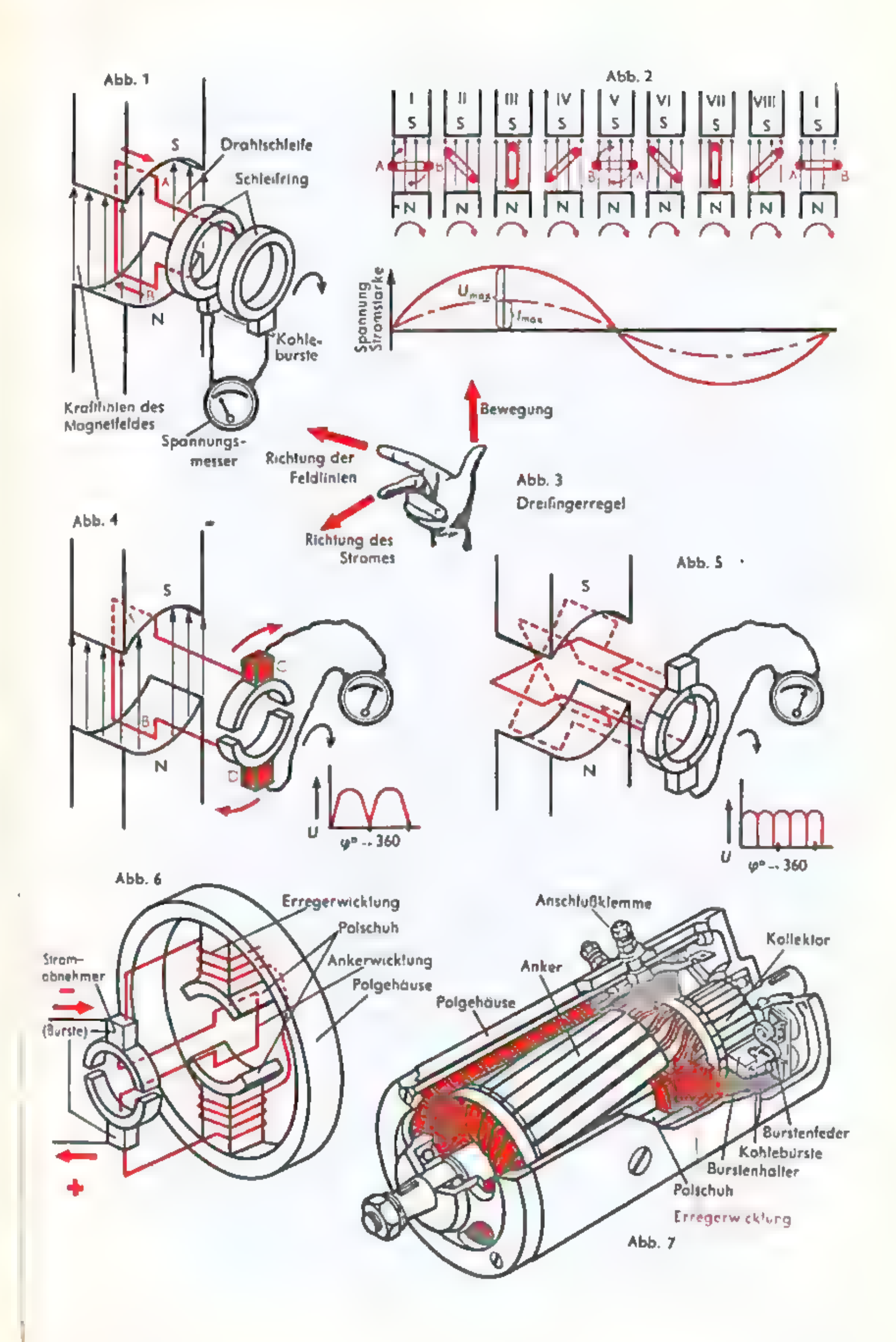
LICHTMASCHINE I

Grundlagen: Die Lichtmaschine wandelt mechanische Arbeit in elektrische Energie um, sie arbeitet als Generator. Die Autolichtmaschine wird meist mit einem Keilriemen vom Motor angetrieben. Bei laufendem Motor liefert die Lichtmaschine elektrischen Strom. Sie ist in ihrer Leistung so ausgelegt, daß einerseits alle Verbraucher elektrischer Energie wie die Zündanlage, die Scheinwerfer usw. versorgt werden, andererseits auch die Batterie genügend aufgeladen wird.

Die Wirkungsweise eines jeden Generators beruht auf der Erscheinung der Induktion: Wird eine Drahtspule durch das Kraftlinienfeld eines Magneten bewegt, so schneiden die Drähte der Spule die Kraftlinien. Als Folge fließt durch die Spule ein elektrischer Strom, wenn beide Drahtenden der Spule mit einem Stromverbraucher verbunden sind. Die Spule sei (Abb. 1) zur leichteren Erklärung des Vorganges durch eine einzige Drahtschleife ersetzt. Die Drahtschleife wird im Kraftlinienfeld eines Dauermagneten gedreht. Die beiden Enden der Drahtschleife sind jeweils mit einem Schleifring verbunden. Auf jedem Ring schleift eine Kohlebürste. An die zwei Bürsten ist ein sehr empfindlicher Spannungsmesser angeschlossen. Dreht man die Drahtschleife aus der waagerechten Lage im Uhrzeigersinn (Abb. 2), so bewegt sich die Drahtschleife zunächst parallel zu den Kraftlinien des Magneten. Der Zeiger des Spannungsmessers schlägt nicht aus. Je weiter die Drahtschleife gedreht wird, um so mehr Kraftlinien schneidet sie, um so stärker schlägt der Zeiger des Spannungsmessers aus. Die Spannung steigt so lange an, bis der Drahtbügel senkrecht steht, da in dieser Lage die Zahl der geschnittenen Kraftlinien am größten ist. Dreht man die Drahtschleife weiter in der gleichen Richtung, so nimmt die Spannung wieder ab. Bei waagerechter Lage der Drahtschleife ist sie wieder Null. Während dieser halben Umdrehung der Drahtschleife bewegte sich der linke Bügel A von links nach rechts, der rechte Bügel B von rechts nach links durch das Magnetfeld. Nach der Dreifingerregel (Abb. 3) fließt der Strom in der in Abb. 1 gezeigten Richtung. Wird der Drahtbügel im Uhrzeigersinn über die waagerechte Lage hinausgedreht, so bewegen sich die Drahtbügel A und B in entgegengesetzter Richtung durch das Magnetfeld. Der Strom fließt in entgegengesetzter Richtung durch die beiden Bügel (Dreifingerregel!). Der Spannungsmesser schlägt nach der anderen Seite aus. Daraus folgt, daß beim Drehen eines Drahtbügels oder einer entsprechenden Drahtspule in einem Magnetfeld immer ein Strom mit wechselnder Richtung, ein Wechselstrom erzeugt wird.

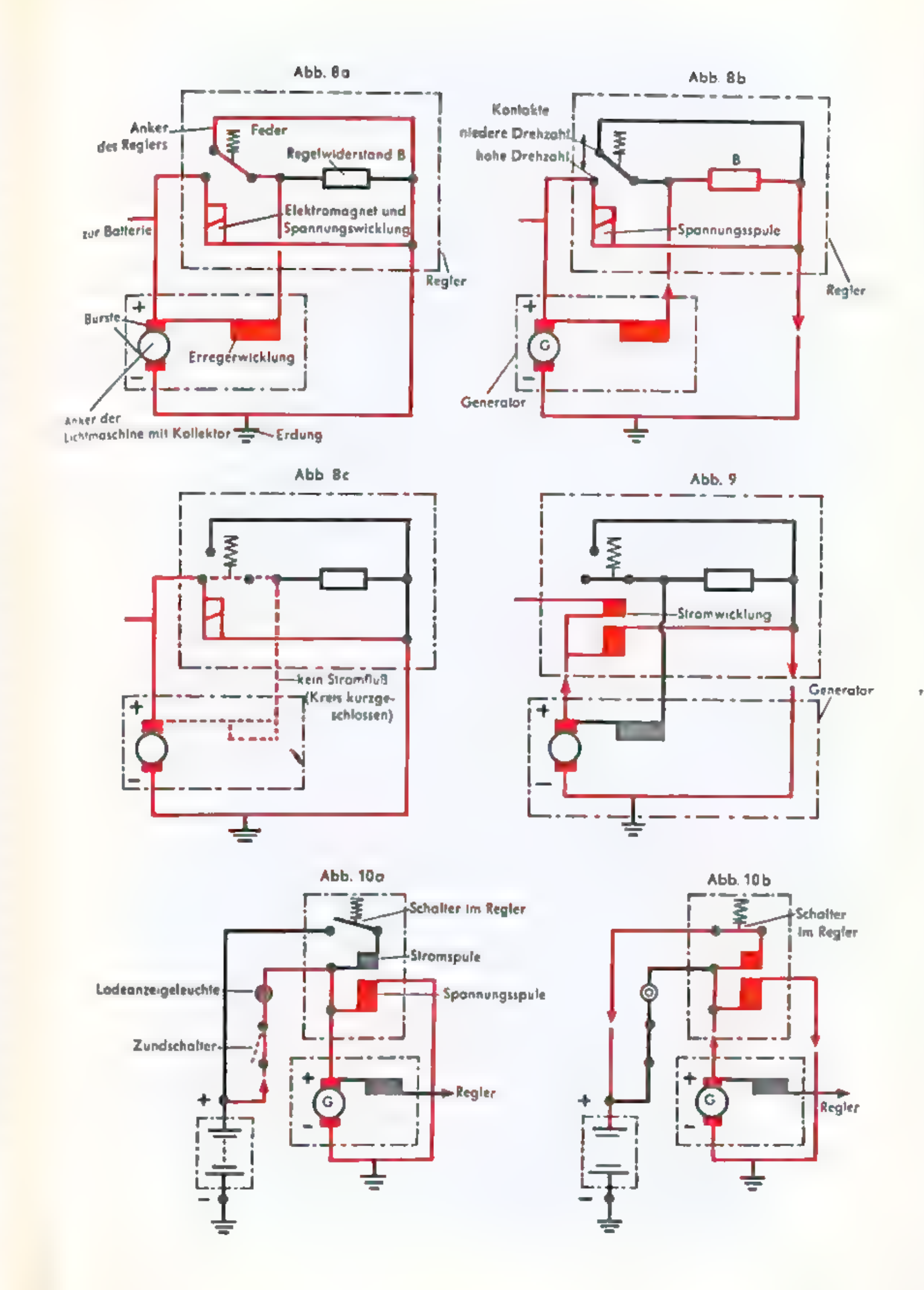
Gleichstromlichtmaschine: Die Autobatterie kann nur mit Gleichstrom geladen werden, so daß Maßnahmen zur Umwandlung des Wechselstroms in Gleichstrom ergriffen werden müssen. Die beiden Schleifringe der Wechselstrommaschine (Abb. 1) werden ersetzt durch die zwei gegeneinander isolierten Halbringe des Stromwenders (Abb. 4). Jeder Halbring ist mit einem Ende des Drahtbügels verbunden. Während einer Umdrehung des Drahtbügels sind die Bügel A und B jeweils für eine halbe Umdrehung mit dem oberen bzw. unteren Stromabnehmer verbunden. Bei der oberen Kohlenbürste C bewegen sich die Drahtschleifen immer von links nach rechts, bei der unteren Bürste D von rechts nach links durch das Magnetfeld. Daher fließt der Strom in der Drahtschleife immer in gleicher Richtung. Spannung und Stromstärke verändern sich während einer halben Umdrehung der Drahtschleife wie bei der Wechselstrommaschine. Um diesen in seiner Stärke schwankenden, pulsierenden Gleichstrom zu glätten, werden viele zueinander versetzte Drahtschleifen angeordnet (Abb. 5). Der Schleifring ist in eine entsprechende Zahl zueinander isolierter Segmente unterteilt und wird Stromwender (Kollektor) genannt. Der Anker nimmt die aus vielen Windungen bestehenden Drahtschleifen und den Kollektor auf.

Der Magnet ist nur bei sehr kleinen Generatoren (z.B. beim Fahrraddynamo) ein Dauermagnet aus Stahl. Die Lichtmaschine hat dagegen einen Elektromagneten. Die-



ser ist parallel zu den beiden Stromabnehmern geschaltet (Abb. 6). Beginnt man die Ankerwicklung zu drehen, so wird ein sehr schwacher Strom erzeugt, da in den Eisenteilen des Elektromagneten etwas Restmagnetismus verbleibt. Der schwache Induktionsstrom durchfließt die Drahtspule des Elektromagneten. Dadurch wird dessen Magnetismus verstärkt. Das erhöht die Stromstärke in der Wicklung des Ankers und damit den Kraftlinienfluß des Elektromagneten. Auf diese Weise erregt sich die Maschine (Schnitt Abb. 7) selbst bis zur Sättigung des Magnetfeldes.

Regler: Die Spannung und der von der Lichtmaschine abgegebene Strom hängen von der Antriebsdrehzahl und von dem magnetischen Kraftlinienfluß ab. Da die Motordrehzahl eines Kraftfahrzeuges starken Schwankungen unterworfen ist, ergibt sich daraus grundsätzlich eine ständige Änderung der Spannung und des Lichtmaschinenstromes. Trotz unterschiedlicher Drehzahl und schwankender Belastung der Lichtmaschine soll aber eine gleichbleibende Spannung erzeugt und die Batterie in immer gut geladenem Zustand gehalten werden. Die Spannung der Lichtmaschine läßt sich bei schwankender Drehzahl durch Änderung des magnetischen Kraftlinienflusses auf gleicher Höhe halten. Hierzu muß mit Hilfe einer Regelvorrichtung der Strom, der den Elektromagnet der Lichtmaschine durchfließt, verändert werden. Der Regler besteht aus einigen Kontaktschaltern, die von kleinen Elektromagneten betätigt werden. Zwischen dem Plusanschluß und dem Minusanschluß der Lichtmaschine liegt ein kleiner Elektromagnet. Erzeugt die Lichtmaschine bei niederer Drehzahl nur eine geringe Spannung, so reicht der durch die Windungen der Spannungsspule fließende Strom nicht aus, um ein so kräftiges Magnetfeld zu erzeugen, daß der Anker des Reglerkontaktes entgegen der Kraft einer kleinen Blattfeder angezogen wird. Der für die Erregerwicklung benötigte Strom fließt von der Plusbürste der Lichtmaschine durch die Erregerwicklung über den durch Federkraft geschlossenen Kontakt des Reglers zur Minusbürste, wodurch die Lichtmaschine kräftig erregt wird (Abb. 8a). Steigt unter dem Einfluß der Erregung die Spannung der Lichtmaschine an, so bewirkt der größere Strom, der durch die Spannungsspule des Reglers fließt, daß der Anker des Reglerkontaktes entgegen der Federkraft angezogen wird. Die Kontakte des Reglers öffnen sich, wodurch der Strom von der Plusbürste über die Erregerwicklung nicht mehr direkt, sondern über den Widerstand B zur Minusbürste der Lichtmaschine fließen kann (Abb. 8b). Dadurch wird der Strom, der zur Erregerwicklung fließt, so stark verringert, daß die Lichtmaschine eine geringere Spannung abgibt. Der Strom, der durch die Windungen der Spannungsspule fließt, sinkt ab, die Magnetkraft läßt nach, der Anker des Reglerkontaktes federt zurück. Der Kontakt des Reglers ist wieder geschlossen. Der Strom kann solange voll zur Erregerwicklung fließen, bis die Lichtmaschinenspannung so stark ansteigt, daß der Reglerkontakt wieder geöffnet wird. Bei niedriger Drehzahl der Lichtmaschine schwingt der Reglerkontakt in der beschriebenen Weise zwischen 50- bis 200mal in der Sekunde, wobei mit steigender Drehzahl die Schließzeit des Kontaktes immer kürzer wird und somit ein immer geringerer Erregerstrom fließt. Steigt die Lichtmaschinendrehzahl weiter an, so bewirkt der stärkere Stromfluß durch die Spannungsspule, daß das entstandene Magnetfeld den Anker des Reglerkontaktes zwischen den Regelkontakten für niedere und hohe Drehzahlen in Schwebe hält. Der Erregerstrom wird dabei ständig von dem Widerstand B geschwächt. Steigt die Drehzahl noch stärker an, so nimmt die Lichtmaschinenspannung wieder zu. Dadurch wird aber die magnetische Kraft der Spule des Spannungsreglers so groß, daß der Anker das Kontaktpaar für hohe Drehzahlen schließt.



LICHTMASCHINE III

Die Leistung ergibt sich als Produkt von Spannung und Strom ($N = U \cdot I$). Da die Spannung bereits geregelt wird, muß die maximale Stromstärke begrenzt werden. Auf den Eisenkern, der die Spannungsspule trägt, wird zusätzlich eine Drahtwicklung aufgebracht, die der gesamte Strom, den die Lichtmaschine abgibt, durchfließt (Abb. 9). Diese zusätzliche Spule (Stromwicklung), bewirkt eine Verstärkung der elektromagnetischen Kraft der Spannungswicklung. Dies führt bei hohem Stromfluß zu einem entsprechenden Reglerspiel, wodurch der Stromfluß zur Erregerwicklung der Lichtmaschine herabgesetzt wird. Damit sinkt die Spannung der Lichtmaschine, diese gibt einen geringeren Strom ab.

Bei stehender Lichtmaschine oder sehr niederer Lichtmaschinendrehzahl besteht eine Spannungsdifferenz zwischen Batterie und Lichtmaschine. Da die Ankerwicklung nur einen geringen Widerstand aufweist, könnte sich die Batterie bei fehlender Abschaltung mit hohem Strom über die Lichtmaschine entladen. Um dies zu verhindern, ist im Regler ein weiterer Magnetschalter vorgesehen. Der Eisenkern des Magnetschalters trägt eine Spannungs- und eine Stromwicklung (Abb. 10a und 10b). Die Spannungsspule ist mit der Plus- und Minusbürste des Generators verbunden. Sie wird so abgestimmt, daß der Anker des Schalterkontaktes von dem Magnetfeld der Spannungsspule angezogen, den Kontakt zur Batterie dann schließt, wenn die Spannung der Lichtmaschine über der der Batterie liegt. Der zur Batterie fließende Strom gelangt durch die Stromspule, wodurch das Magnetfeld der Spannungsspule verstärkt wird (Abb. 10b).

Liegt aber die Batteriespannung über der Lichtmaschinenspannung, so fließt ein Strom in umgekehrter Richtung durch die Stromspule. Damit baut sich in der Stromspule ein entgegengesetzt gerichtetes Magnetfeld auf. Dadurch wird das Magnetfeld der Spannungsspule so geschwächt, daß der Anker die Schaltkontakte durch Federkraft öffnet (Abb. 10a).

Die Ladeanzeigeleuchte liegt zwischen Pluspol der Batterie und des Generators. Ist bei eingeschalteter Zündung die Spannung der Batterie höher als die der Lichtmaschine, so fließt bei geöffnetem Schalterkontakt des Reglers ein Strom durch die Ladeanzeigeleuchte. Diese leuchtet auf und zeigt, daß die Zündung eingeschaltet ist und die Batteriespannung über der der Lichtmaschine liegt. Schließt der Schaltkontakt des Reglers, so wird die Ladeanzeigeleuchte kurzgeschlossen. Sie erlischt und zeigt an, daß der Generator arbeitet und an das Verbrauchernetz angeschlossen ist. Den schaltungsgerechten Aufbau eines häufig verwendeten Zweielementenreglers zeigen die Abb. 11a bis 11d (Kontakt 1 niedrige, Kontakt 2 hohe Drehzahl).

Drehstromlichtmaschine: Jeder Generator erzeugt zunächst einen Wechselstrom. Dieser wird bei der Gleichstromlichtmaschine durch den Kollektor gleichgerichtet. Bei der Drehstromlichtmaschine fehlt dieser Kollektor. Die Gleichrichtung des Wechselstromes geschieht hier in Halbleiterdioden, die den durchfließenden Strom in einer Richtung sperren, in der anderen Richtung aber ungehindert fließen lassen. Die Halbleiterdioden sind an der Lichtmaschine angebracht. Neben der Art der Gleichrichtung des erzeugten Drehstromes unterscheidet sich die Drehstromlichtmaschine (Abb. 12) auch in ihrem Aufbau von der Gleichstromlichtmaschine. Der Erregerstrom fließt über Bürsten und Schleifringe zu der im Rotor umlaufenden Erregerwicklung, die ein umlaufendes Magnetfeld aufbaut. Das Magnetfeld schneidet die im feststehenden Ständer angeordneten Drahtspulen der Ständerwicklung. Dadurch wird in diesen der Arbeitsstrom erzeugt. Wegen der geringen Eisenmenge des Rotors (Erregerläufers) muß zur Vorerregung des Magnetfeldes Batteriestrom zugeführt werden. Der Restmagnetismus reicht nicht zur sicheren Selbsterregung aus. Die Drehstromlichtmaschine baut kleiner als eine vergleichbare Gleichstromlichtmaschine und gibt bereits im Leerlauf einen Teil ihrer Leistung ab; ihre Regelung geschieht durch Beeinflussung des Erregerstromes ähnlich wie bei der Gleichstromlichtmaschine.

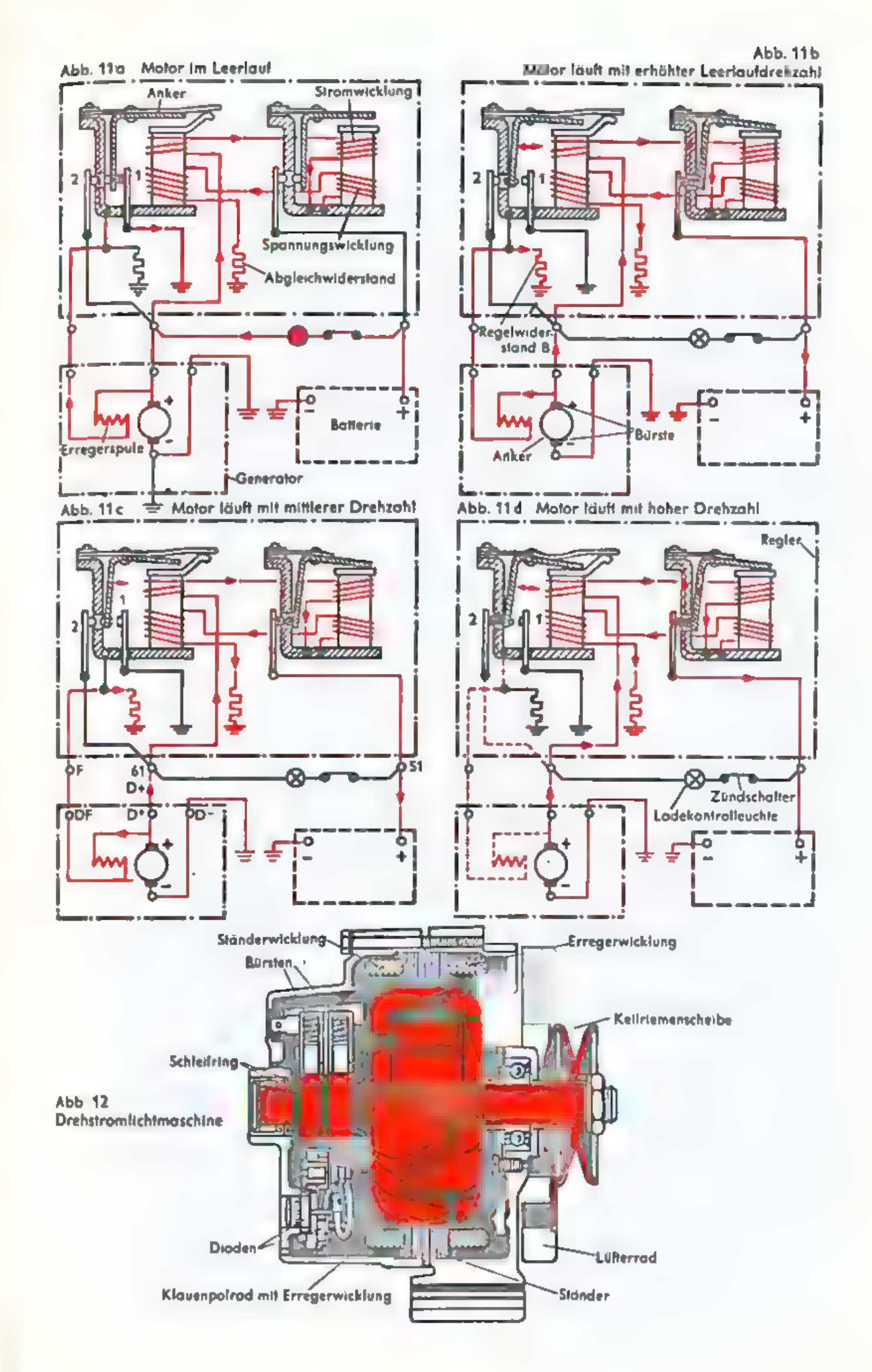


Abb. 11a Motor im Leerlauf

Abb. 11b Motor läuft mit erhöhter Leerlaufdrehzahl

Abb. 11c Motor läuft mit mittlerer Drehzahl

Abb. 11d Motor läuft mit hoher Drehzahl

Abb. 12 Drehstromlichtmaschine

ANLASSER

Das Starten von Verbrennungsmotoren geschieht im allgemeinen dadurch, daß ein mit Batteriestrom betriebener Anlasser das Schwungrad des Motors so lange in Drehung versetzt, bis der Motor aus eigener Kraft weiterlaufen kann. Bei Ottomotoren sind dabei Drehzahlen von 50 bis 60, bei Dieselmotoren solche von etwa 100 Umdrehungen pro Minute notwendig. Die Drehung des Schwungrades kommt dadurch zustande, daß ein Ritzel (kleines Zahnrad), das auf der Welle des Anlassers sitzt, beim Beginn des Anlaßvorganges vorgeschoben wird, bis es in den Zahnkranz auf dem Rand des Schwungrades eingreift (Einspuren). Durch den Antriebsmotor des Anlassers wird das Schwungrad in Drehung versetzt. Nach Beendigung des Anlaßvorganges (wenn der Motor von allein läuft) wird das Anlasserritzel wieder zurückgezogen (Ausspuren). Die verschiedenen Anlasserbauarten, die heute verwendet werden, unterscheiden sich in der Hauptsache durch die Art des Ein- und Ausspurens.

Schubankeranlasser (Abb. 1 und 2)

Bei der Betätigung des Anlasserdruckknopfes im Wageninneren wird die Verbindung zwischen Batterie und Magnetschalter hergestellt. Es entsteht in der Magnetschalterwicklung ein starkes Magnetfeld. Dadurch wird der Anker dieses Magnetschalters so weit nach vorn gezogen, daß die Kippbrücke den Kontakt I schließt und damit die Hilfswicklung und die Haltewicklung von Strom durchflossen werden. Dadurch wird der Anker unter steiger, langsamer Drehung in das Magnetfeld der Hilfswicklung hineingezogen und spurt in den Zahnkranz des Schwungrades ein.
Beim Vorziehen wird der Auslösehebel freigegeben, der den Kontakt II an der Kippbrücke schließt (Abb. 1b). Die Hauptwicklung ist jetzt stromdurchflossen, der Anker dreht sich, der Motor wird durchgedreht. Beim Loslassen des Anlasserknopfes wird der Anker stromlos; er wird durch die Rückzugsfeder zurückgezogen (ausgespurt).

Schubschraubtriebanlasser (Abb. 3 und 4)

Bei diesem Anlassertyp ist das Ritzel entlang der Ankerwelle auf einem Steilgewinde verschiebbar. Bei Betätigung des Anlasserknopfes wird der Anker des Magnetschalters angezogen und das Ritzel unter Drehung durch den Einspurhebel nach vorn geschoben. In der zweiten Einschaltstufe wird der Magnetschalter geschlossen, die Einzugswicklung wird stromlos, der Anker des Anlassers beginnt sich zu drehen und schraubt das Ritzel völlig nach vorn, bis es in den Zahnkranz eingespurt ist. Durch die Haltewicklung wird der Magnetschalter in seiner Lage gehalten. Nun kann der Anlassermotor den Motor durchdrehen. Nach dem Anspringen des Motors wird der Einspurhebel durch die Rückholfeder in die Ruhestellung zurückgezogen; beginnt der Motor schneller zu laufen als der Anlasser, so wird das Ritzel durch einen Rollenfreilauf von der Ankerwelle losgekuppelt.
Alle Anlasserbauarten können auch in ihrer ersten Einschaltstufe mechanisch durch einen Fußhebel betätigt werden, wie in Abb. 5 am Beispiel eines Schubtriebanlassers gezeigt wird. Diese Bauart ist einfacher als die des Schubschraubtriebanlassers, weil hier das Ritzel beim Einspuren nicht gedreht wird.

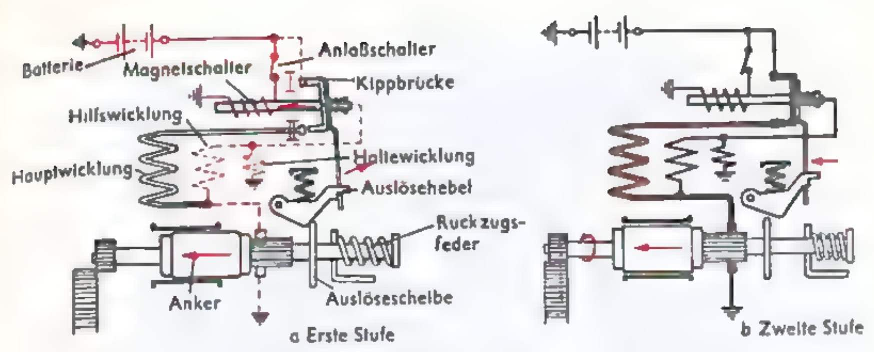


Abb. 1 Einspurstufen beim Schubankeranlasser

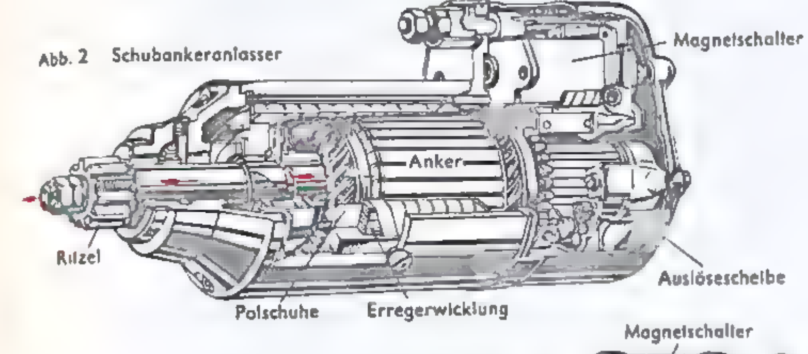


Abb. 2 Schubankeranlasser

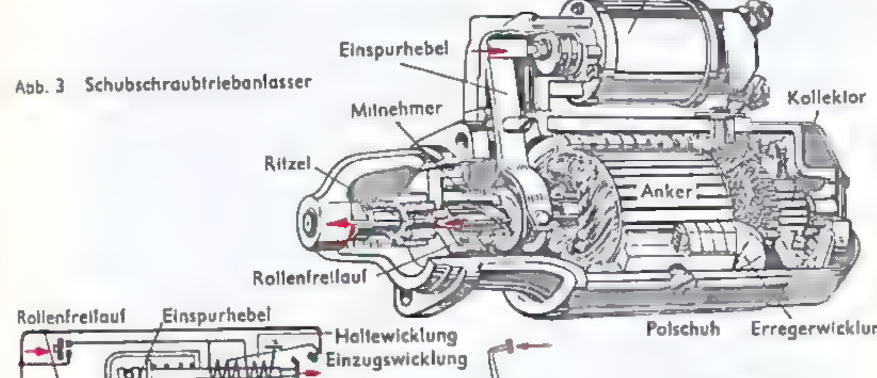


Abb. 3 Schubschraubtriebanlasser

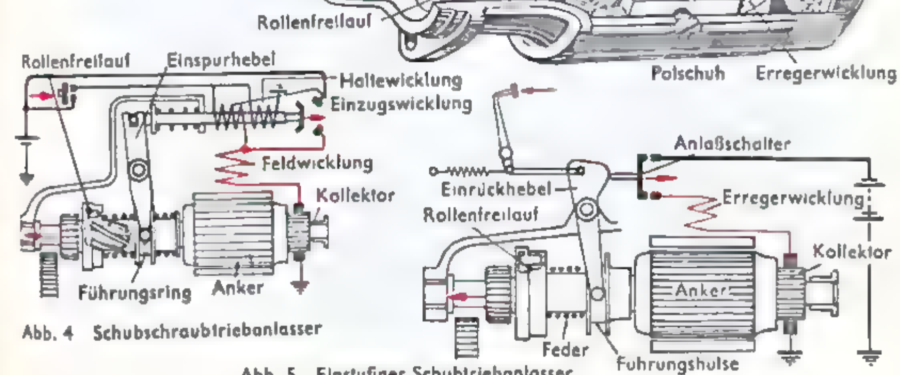


Abb. 4 Schubschraubtriebanlasser

Abb. 5 Einstufiger Schubtriebanlasser

SCHEINWERFER I

Ein Kraftfahrzeugscheinwerfer besteht aus dem Gehäuse (meistens in der Karosserie eingelassen), dem Reflektor, der Streuscheibe und den Glühlampen mit Fassung.
Der Spiegel oder Reflektor hat die Aufgabe, das vom Glühfaden der Lampe nach allen Seiten ausgestrahlte Licht zu bündeln und in Fahrtrichtung zu werfen. Die Reflektoren sind als Paraboloide ausgebildet, sie werfen alle auftreffenden Strahlen, die von einer in ihrem Brennpunkt angeordneten Lichtquelle ausgehen, parallel zur Paraboloidachse zurück (Abb. 1). Sind die Lichtquellen nicht im Brennpunkt aufgestellt (Abb. 2 und Abb. 3), so wird die Lichtleistung des Scheinwerfers in der gewünschten Richtung durch Zerstreuung der Strahlen erheblich herabgesetzt. Die Reflektoren werden aus Stahl hergestellt, auf dessen Oberfläche Aluminium im Vakuum aufgedampft wird; sie reflektieren etwa 89% der auftreffenden Lichtmenge.
Die Gläser der Scheinwerfer dienen als Streuscheibe, d.h., sie sollen das Licht so verteilen, daß auch die Zone seitlich und unmittelbar vor dem Wagen beleuchtet wird. Man erreicht dies durch Rillen oder Rippen im Glas, die als Prismen (Abb. 4a und 4b) wirken und das Licht ablenken. Diese Streuung vermindert natürlich die Helligkeit in der Hauptrichtung.
Die wichtigsten Bedingungen, die die Glühlampen erfüllen müssen, sind eine genaue Lage des Glühfadens im Brennpunkt des Spiegels und große Lichtausbeute bei möglichst geringer Größe. Die erste Bedingung wird durch genaue Fixierung der Befestigungslappen am Sockel der Glühlampe zu der Lage des Glühfadens erreicht. So sitzt bei richtiger Anbringung der Lampe der Glühfaden immer im Brennpunkt. Eine hohe Lichtausbeute ergeben Wolframdrähte, die als Wendel oder Doppelwendel in einem mit Edelgas gefüllten Kolben eingeschmolzen sind.
Bei der heute meistens verwendeten Biluxlampe, einer Zweifadenlampe mit Abdeckschirm (Abb. 5a und 5b), befindet sich der Glühfaden für Fernlicht im Brennpunkt des Scheinwerfers. Der getrennt einschaltbare Glühfaden für das Abblendlicht sitzt einige Millimeter vor dem Brennpunkt und außerdem etwas höher (Abb. 5a). Dadurch verläßt das Licht als gestreutes, kegeliges Bündel den Spiegel (Abb. 6a). Die auf den unteren Teil des Spiegels auftreffenden Strahlen würden nach oben abgelenkt werden. Dies verhindert ein Abdeckschirm unter dem Glühfaden, der die nach unten gehenden Strahlen und durch eine Aufbördelung an der Vorderseite die direkt nach vorn austretenden Strahlen abfängt.
Fernlicht kann nachts, bei dem auf den Straßen herrschenden starken Verkehr, nur noch selten benutzt werden. Das symmetrische Abblendlicht mit seiner waagerecht verlaufenden Hell-Dunkel-Grenze hat nur eine geringe Reichweite; außerdem leuchtet es den rechten Fahrbahnrand schlecht aus (Abb. 7). Die Leistungsaufnahme der symmetrischen Zweifadenlampe beträgt 35 Watt für Fern- und Abblendlicht.
Die Lampe des asymmetrischen Abblendlichtes weist dagegen eine Leistungsaufnahme von 40 Watt bei Abblendlicht und 45 Watt bei Fernlicht auf. Dieses System hat gegenüber dem symmetrischen Abblendlicht nicht nur eine gesteigerte Leistungsaufnahme der Glühlampen, sondern auch eine bessere Ausleuchtung der rechten Fahrbahnseite auf eine größere Entfernung (Abb. 8). Dabei tritt keine größere Blendwirkung ein, als bei dem symmetrischen Abblendlicht, denn die Leuchtweite auf der linken Fahrbahnseite entspricht diesem. Die ungleichmäßige, asymmetrische Lichtverteilung wird besonders dadurch erreicht, daß der Abdeckschirm, der unter der Glühwendel des Abblendlichtes einer Zweifadenlampe angeordnet ist (Abb. 5a) in Fahrtrichtung gesehen links von der Glühwendel um 15° nach unten abgebogen wird (Abb. 9a). Das in die linke Seite der unteren Hälfte des Reflektors eingestrahlte Licht wird nach rechts oben in Fahrtrichtung zurückgeworfen. (Abb. 9b). Dadurch entsteht ein „Lichtkeil", der von der von links nach rechts zunächst waagrecht verlaufenden Hell-Dunkel-Grenze ausgeht, und nach rechts oben ansteigt. Dieser kann deutlich wahrgenommen werden, trifft er in wenigen Metern Entfernung von den beiden

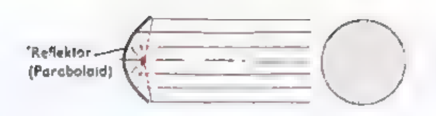


Abb. 1 Lichtquelle im Brennpunkt Strahlen werden parallel zurückgeworfen

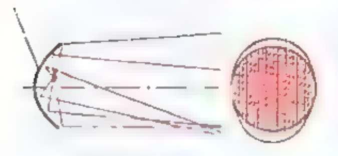



Abb. 2 Lichtquelle ober- oder unterhalb des Brennpunktes Strahlen werden zerstreut

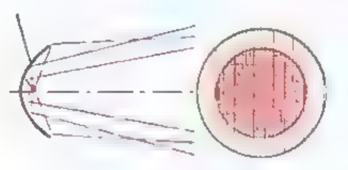




Abb. 3 Lichtquelle vor oder hinter dem Brennpunkt Strahlen werden zerstreut

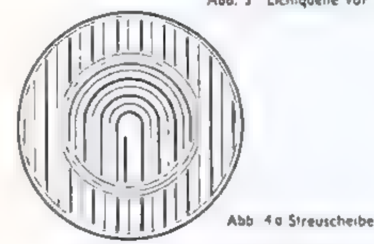


Abb. 4a Streuscheibe

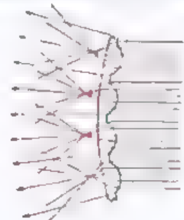


Abb. 4b Lichtverteilung durch die Streuscheibe

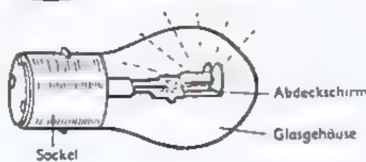


Abb. 5a Biluxlampe (Abblendlicht)

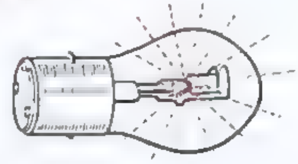


Abb. 5b Biluxlampe (Fernlicht)

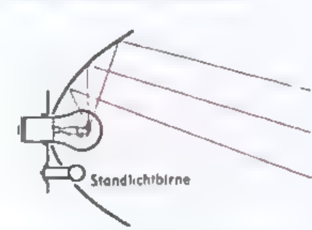


Abb. 6a Austritt der Strahlen bei Abblendlicht

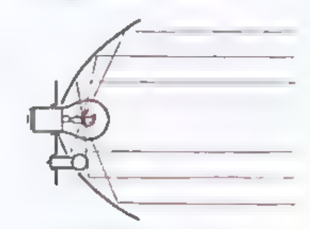
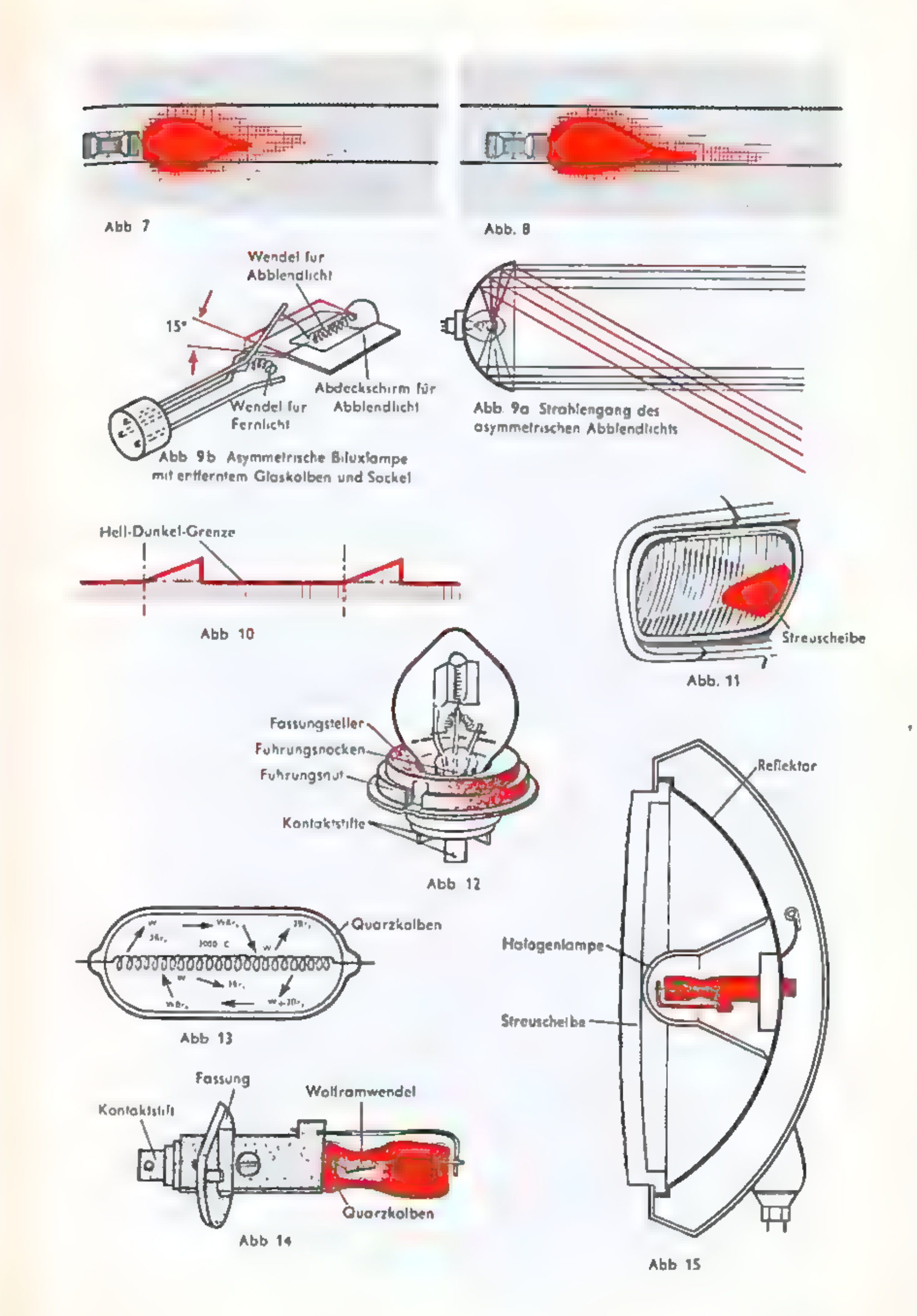


Abb. 6b Strahlengang bei Fernlicht

Scheinwerfern auf eine senkrechte Wand (Abb. 10). Er führt zu einer besseren und wesentlich weiter reichenden Ausleuchtung der rechten Fahrbahn. Um die Blendwirkung auszuschalten, ist die Streuscheibe in dem Gebiet, das von dem asymmetrischen Teil des Lichtes durchstrahlt wird, mit besonders angeordneten Rillen und Rippen versehen. Diese brechen den scharf gebündelten, von Reflektor zurückgeworfenen Lichtstrahl und bewirken eine gleichmäßige Lichtverteilung im „Keil". Der anders gerippte Bereich der Streuscheibe ist deutlich zu erkennen (Abb. 11). Die Lage der Lichtquelle muß sehr genau auf Reflektor und Streuscheibe abgestimmt sein, um Blenden zu vermeiden. Die Lampe für asymmetrisches Abblendlicht ist daher genau im Reflektor fixiert und hierzu mit einem besonders großen Fassungsteller mit Führungsnocken und Nuten versehen, der in eine entsprechend ausgebildete Öffnung des Reflektors paßt (Abb. 12).
Die Lichtleistung einer Lampe hängt von der Temperatur des glühenden Wolframfadens ab. Obgleich Wolfram erst bei 3370°C schmilzt, und der Glaskolben einer Biluxlampe mit Argon gefüllt ist, das unter einem Druck von 3–4 at steht, verdampft bei der für diese Lampen üblichen Glühtemperatur von ca. 2500°C etwas Wolfram. Dieser allmähliche Materialverlust der Glühwendel führt zu einer langsamen Abnahme der Drahtdicke und nach längerer Betriebszeit zum Bruch oder Durchschmelzen des zu dünn gewordenen Fadens.
Diesen Nachteil weisen Halogenlampen nicht auf. Der Edelgasfüllung des Glaskolbens von Halogenlampen ist eine geringe, genau bemessene Menge eines Halogens beigegeben. „Halogen" ist die Sammelbezeichnung für die mit Metallen salzbildenden, nichtmetallischen Elemente Fluor, Chlor, Brom und Jod. Zunächst nahm man Jod; heute wird jedoch Brom (Br) verwendet. Schaltet man eine Halogenlampe ein, so beginnt der Wolframfaden unter dem Stromzufluß zu glühen. Dabei verdampft etwas Wolfram (W), das sich in der Nähe des Lampenkolbens abkühlt und unterhalb von 1400°C mit dem Brom zu dem gasförmigen Wolframbromid (WBr_3) verbindet. Dieses Wolframbromid kann sich nicht auf dem Glaskolben niederschlagen, da es gasförmig bleibt. Das Wolframbromid gelangt irgendwann wieder in die Nähe der glühenden Wolframwendel. Dort wird die Verbindung in Folge der hohen Fadentemperatur auf über 1400°C aufgeheizt, wodurch sie in ihre Elemente Wolfram und Brom zerfällt. Das Wolfram schlägt sich auf der Wendel nieder, und das Brom steht für den Vorgang erneut zur Verfügung (Abb. 13). Auf die Dauer gesehen verliert der Wolframfaden nicht an Material, denn was verdampft, kehrt über eine Art Kreisprozeß zum Faden zurück. Damit dieser Vorgang ungestört abläuft, ist der Lampenkörper wesentlich kleiner ausgeführt als bei einer üblichen Biluxlampe (Abb. 14), so daß der Kolben die für den Ablauf des Prozesses erforderliche hohe Temperatur annimmt. Normales Glas würde bei dieser Hitze zerspringen und außerdem von dem reaktionsfreudigen Brom angegriffen werden. Der kleine Kolben einer Halogenlampe ist daher aus dem hochschmelzenden reinen Quarz (SiO_2) hergestellt.
Halogenlampen haben eine Leistung von 55 Watt. Sie können zur Zeit nur als Einfadenlampe hergestellt werden. Die Halogenlampe weist eine um 100% höhere Lichtausbeute auf als die normale Biluxlampe, ohne dabei stärker zu blenden.
Die Halogennebelleuchte (Abb. 15) strahlt weiter und leuchtet das Vorfeld besser aus als ein Nebelscheinwerfer mit normaler Lampe (die Nebelleuchten dürfen nur zusammen mit dem Abblendlicht brennen). Für die Halogenfernscheinwerfer sind drei verschiedene Schaltungen erlaubt: 1. Die Halogenlampe brennt bei Fernlicht allein ohne das normale Fernlicht. 2. Die Halogenlampe brennt mit Fernlicht (großer Stromverbrauch). 3. Die Halogenlampe brennt zusammen mit normalem Abblendlicht als Fernlicht (beim Abblenden brennt nur normales Abblendlicht).



VERGASER I

Vergaser erzeugen das für den Betrieb von Ottomotoren notwendige Kraftstoff-Luft-Gemisch. Strenggenommen wird im Vergaser der Kraftstoff nicht vergast, sondern nur durch die angesaugte Luft ein „Gemischnebel" erzeugt, in dem der flüssige Treibstoff in Form von kleinen Tröpfchen in einem Luftstrom verteilt ist. Durch Wärmeaufnahme auf dem Weg bis zum Zylinder werden diese kleinen Flüssigkeitsteilchen dann verdampft. Dieses Flüssigkeitsdampf-Luft-Gemisch gelangt schließlich in den Verbrennungsraum des Zylinders. Moderne Vergaser weisen vier verschiedene Systeme auf: den Hauptvergaser, das Leerlaufsystem, die Beschleunigungspumpe und die Starteinrichtung.

Zur Verbrennung des Gemischs im Zylinder ist Sauerstoff notwendig; er strömt mit der vom Kolben beim Rückgang angesaugten Luft ein. Dabei muß die Luft durch ein Filter und ein Ansaugrohr strömen. Im Ansaugrohr wird das Benzin von der Luft mitgerissen (Abb. 1b). Man bedient sich dabei einer Erscheinung, die durch die Bernoullische Gleichung beschrieben wird: Die Summe aus statischem Druck und Staudruck ist stets gleich (s. S. 18). Daraus folgt, daß bei Erhöhung der Geschwindigkeit der statische Druck abnehmen muß. Verengt man das Ansaugrohr an einer Stelle, so muß die gleiche Menge Luft durch diesen verengten Querschnitt mit erhöhter Geschwindigkeit strömen. An der Stelle erhöhter Geschwindigkeit sinkt der Druck sehr stark ab, es entsteht also ein Unterdruck gegenüber der Umgebung. Dadurch wird das Benzin aus dem Mischrohr herausgerissen und zerstäubt (Abb. 1b). Die feinen Tröpfchen führt der Luftstrom zum Zylinder. Diese Vorgänge schildern die Arbeitsweise des Hauptvergasers. Die Luftansaugleitung legt man zweckmäßig entlang der Abgasleitung. Durch die abgestrahlte Wärme dieser Teile erhitzt sich der Luftstrom. Die Strahlungswärme genügt, um das tropfenförmige Benzin zu verdampfen. Die Hauptdüse, die eine Verengung in der Zuflußleitung des Kraftstoffes vom Schwimmergehäuse zum Mischrohr darstellt, begrenzt die der Luft im Mischkanal in der Zeiteinheit zumischbare Kraftstoffmenge, da vom Schwimmergehäuse nur so viel Kraftstoff nachfließen kann, wie die enge Bohrung der Hauptdüse zuläßt. Die Begrenzung des Benzinzulaufs zum Vergaser besorgt die Schwimmereinrichtung. Diese besteht aus Schwimmerkammer, Schwimmer und Nadelventil. Bei Füllung der Schwimmerkammer mit Benzin steigt der Schwimmer, ein Hohlkörper aus Messingblech, so lange an, bis die Ventilnadel auf den Ventilsitz drückt und den Benzinzufluß sperrt. Dadurch ist es möglich, das Niveau des Kraftstoffes stets 2–3 mm unter der Öffnung des Austrittsrohres zu halten. Bei Ansteigen des Schwimmers in der Kammer wird die Luft, die dabei verdrängt wird, in das Luftansaugrohr zurückgeführt (Entlüftung). Die vom Gaspedal bediente Drosselklappe ist bei Leerlauf geschlossen. Dadurch wird das Vollastsystem ausgeschaltet und dafür das *Leerlaufsystem* in Betrieb gesetzt. Es sorgt für die Gemischabgabe bei Leerlauf (Abb. 3a und b) und arbeitet unabhängig von der Vollasteinrichtung. Bei geschlossener Drosselklappe kann nur wenig Luft durch das Ansaugrohr strömen; sie kann also keinen Kraftstoff aus dem Mischrohr mitreißen. Jedoch tritt an dem engen Spalt zwischen Drosselklappe und Vergasergehäuse eine so große Geschwindigkeitserhöhung ein, daß hinter der Drosselklappe ein kräftiger Unterdruck entsteht. Dieser läßt auch im Leerlaufgemischkanal Unterdruck entstehen, wodurch der Kraftstoff aus dem Leerlaufbenzinkanal abgesaugt wird. Die notwendige Luft wird oben am Lufteintritt eingesaugt. Eine zusätzliche Luftmenge wird an der Luftregulierschraube vorbei angesaugt. Durch Herein- oder Herausdrehen dieser Schraube wird die Zusammensetzung des Kraftstoff-Luft-Gemischs bei Leerlauf fetter oder magerer eingestellt (Abb. 3a). Bei einem anderen System (Abb. 3b) wird nicht die Menge der Zusatzluft, sondern die Zugabemenge des im Leerlaufgemischkanal entstehenden Kraftstoff-Luft-Gemischs zur Luft in der Ansaugleitung durch die Leerlauf-Gemischregulierschraube reguliert. Bei leicht geöffneter Drosselklappe tritt der obere Austrittsschlitz in Tätigkeit. Die Leerlaufstellung der Drosselklappe wird durch einen Anschlag festgelegt.

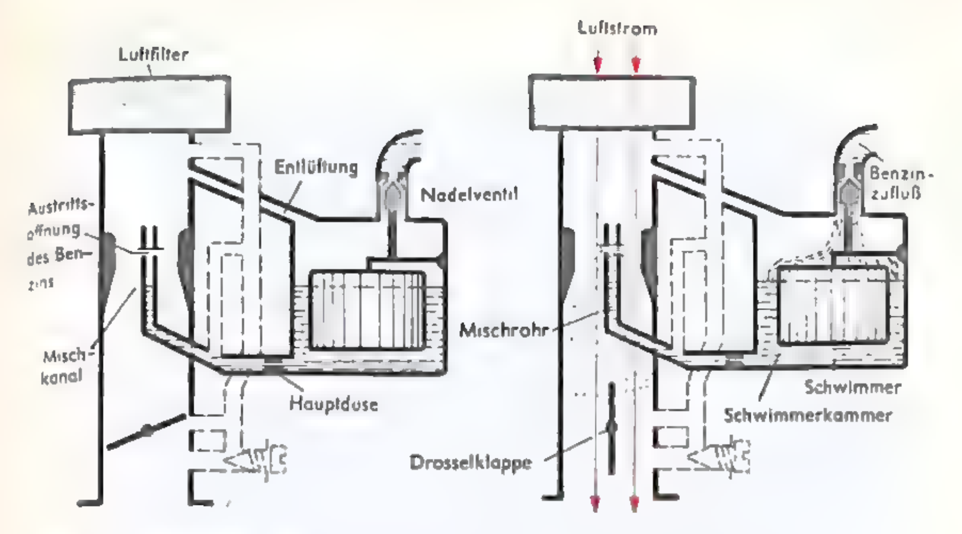


Abb. 1a Vollastsystem in Ruhe

Abb. 1b Vollastsystem in Betrieb

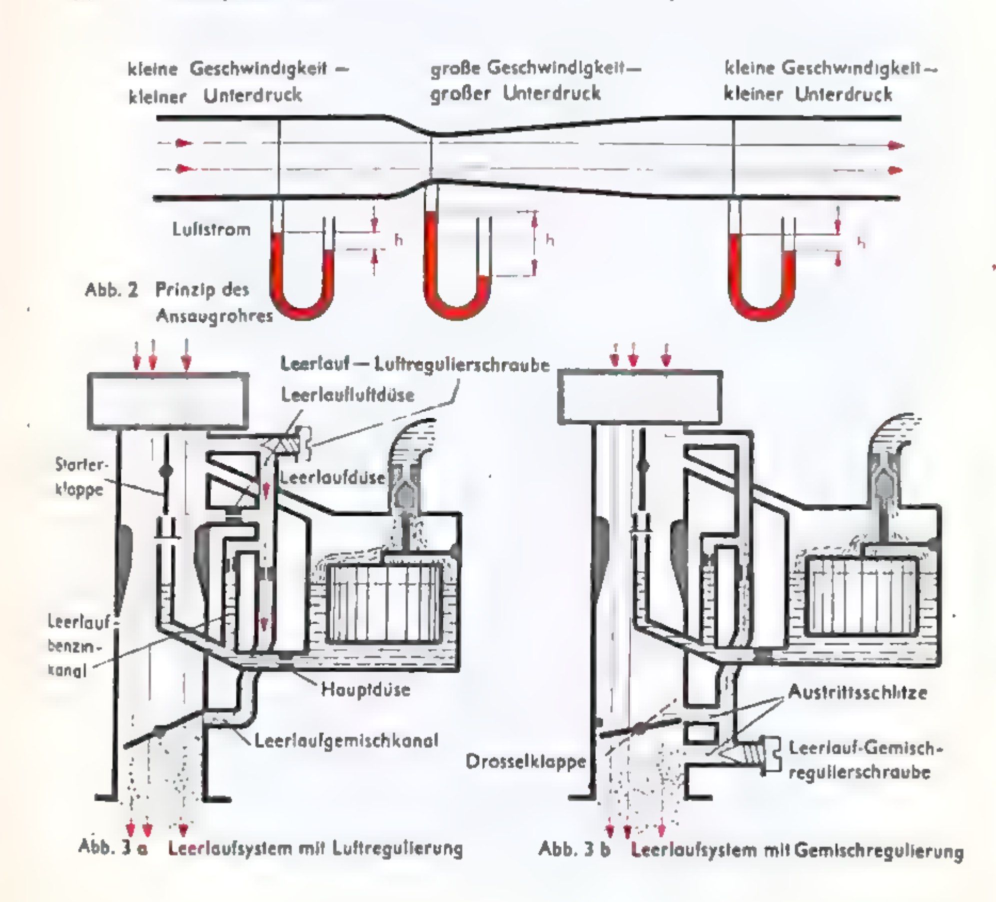


Abb. 2 Prinzip des Ansaugrohres

Abb. 3a Leerlaufsystem mit Luftregulierung

Abb. 3b Leerlaufsystem mit Gemischregulierung

VERGASER II

Plötzliche *Beschleunigungen* des Motors erfordern eine sofortige höhere Leistungsabgabe und damit ein momentan fetteres Gemisch, d. h. ein Gemisch mit kurzzeitig höherem Benzinanteil. Öffnet man bei niedriger Motordrehzahl plötzlich die Drosselklappe, so ist der bei der niedrigen Luftgeschwindigkeit vorhandene Unterdruck nicht ausreichend, aus dem Mischrohr allein genügend Kraftstoff zur Beschleunigung des Motors abzusaugen. Man kann daher entweder eine Vorratskammer anbringen (Abb. 4a), aus der sofort mehr Kraftstoff nachströmt, oder man verwendet eine Einspritzpumpe (Abb. 4b), die mit dem Gaspedal verbunden ist. Beim Niederdrücken des Gaspedals wird durch das Pumpengestänge die Feder entspannt, durch das Auslaßventil und die Düse strömt der Kraftstoff in den Mischkanal. Beim Loslassen des Pedals geht der Pumpenkolben nach oben, das Auslaßventil schließt sich, durch das Einlaufventil fließt neuer Kraftstoff zu, und die Feder wird wieder gespannt.

Beim *Starten* eines kalten Motors schlägt sich ein großer Teil des im Kraftstoff-Luft-Gemisch vorhandenen Kraftstoffes in der kalten Ansaugleitung und an der kalten Zylinderwandung nieder. Damit trotzdem im Verbrennungsraum ein brennfähiges Kraftstoff-Luft-Gemisch vorhanden ist, muß im Vergaser ein besonders fettes Gemisch hergestellt werden. Man verschließt zu diesem Zweck den Eintritt der Hauptluft in den Vergaser durch eine Starterklappe (Abb. 5). Die Drosselklappe ist dabei nur wenig geöffnet. Beim Rückgang des Kolbens im Zylinder des Motors entsteht nun im Vergaser eine sehr starke Pumpwirkung, so daß durch den hohen Unterdruck sowohl aus dem Mischrohr als auch aus dem Leerlaufsystem reichlich Kraftstoff abgesaugt wird. Ist der Motor angesprungen, so sorgt ein Flatterventil in der Starterklappe (Abb. 6) dafür, daß etwas mehr Luft angesaugt werden kann, da für den warm werdenden Motor ein überfettes Gemisch nicht geeignet ist. Bei diesem Flatterventil wird durch den Sog des Motors die Scheibe entgegen der Federkraft abgehoben und so dem Motor mehr Luft zugeführt. Ist die Anwärmzeit vorbei, wird die Luftklappe entweder von Hand oder automatisch geschlossen. Die Automatik wird meist thermisch gesteuert. Hierbei hält eine Spiralfeder die Starterklappe geschlossen. Diese Feder ist aus Bimetall gefertigt, also aus zwei Metallen, die sich bei Erwärmung verschieden stark ausdehnen und die Spannung der Spiralfeder verändern. Bei Erwärmung des Motors erwärmt sich diese Spiralfeder mit und öffnet im gleichen Maß die Starterklappe.

Abb. 6 zeigt den Aufbau eines Fallstromvergasers. Bezeichnungen wie Fallstrom-, Steigstrom- oder Flachstromvergaser sagen etwas über die Richtung aus, in der die angesaugte Luft strömt. Beim Fallstromvergaser ergibt sich eine Strömungsrichtung von oben nach unten, beim Steigstromvergaser entgegengesetzt und beim Flachstromvergaser in horizontaler Richtung.

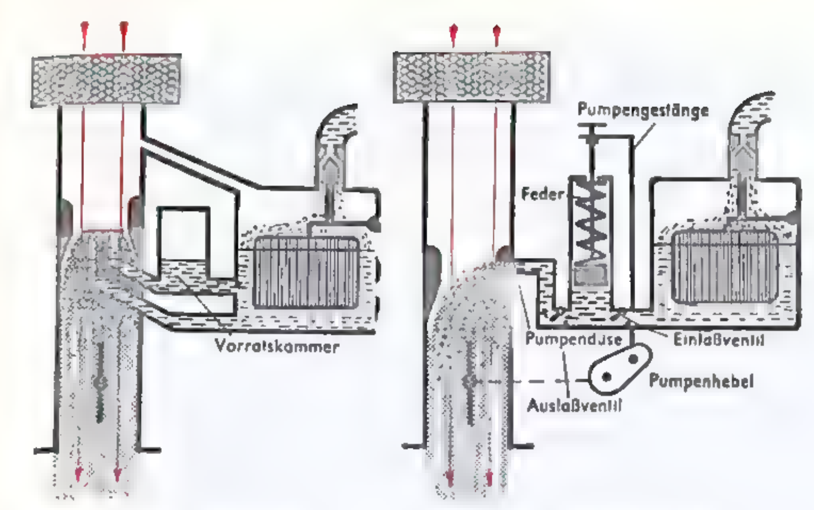


Abb. 4a Beschleunigungssystem mit Vorratskammer

Abb. 4b Beschleunigungssystem mit Einspritzpumpe

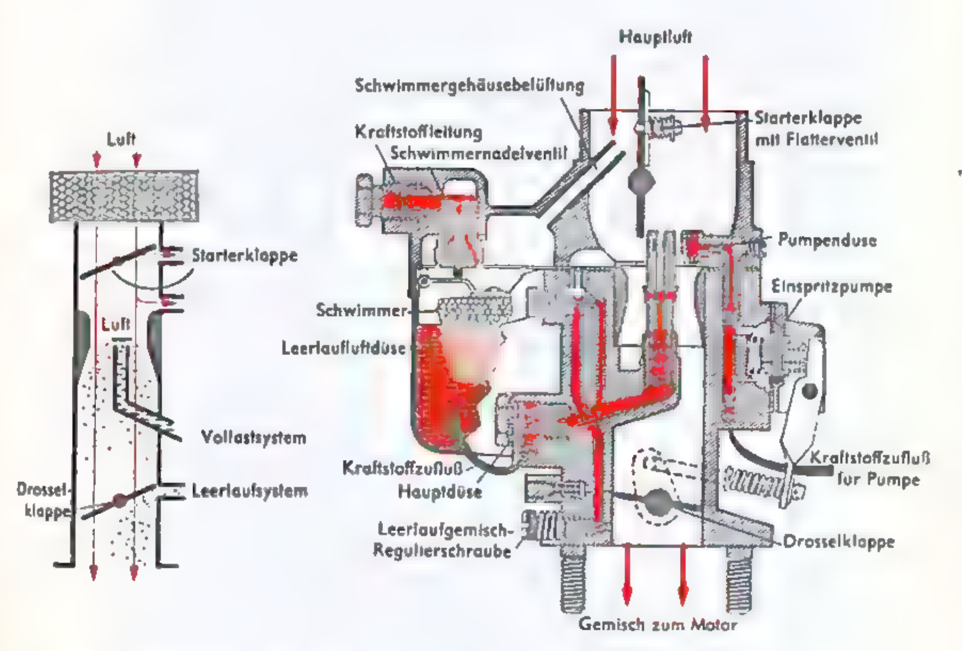


Abb. 5 Gemischbildung beim Kaltstart

Abb. 6 Solex-Fallstromvergaser

DAMPFLOKOMOTIVE

Die Schnellzug-Dampflokomotive (Baureihe 010 der Deutschen Bundesbahn, Abb. 1) weist drei miteinander gekuppelte Treibachsen (Kuppelachsen) auf. Ferner besitzt sie zwei in einem vorderen Drehgestell zusammengefaßte Laufachsen und eine hintere gelenkte Laufachse. Auf diese Achsen verteilt sich das Lokomotivgewicht. Zur Verbesserung der Kurvenläufigkeit ist der Spurkranz der mittleren, ohne Seitenspiel im Rahmen gelagerten Kuppelachse geschwächt. Ferner ist der Drehzapfen im Deichsel- und Drehgestell um ein gewisses Maß seitenverschieblich befestigt. Der zwischen den Treibrädern liegende Innenrahmen ist in biegesteifer Schweißkonstruktion als Kastenträger ausgeführt.

Der Rahmen trägt die Kesselanlage. Der Kessel dehnt sich infolge seiner hohen Arbeitstemperatur gegenüber dem Rahmen aus. Er ist daher nur im vorderen Teil fest mit dem Rahmen verbunden. Die übrigen Befestigungselemente lassen in gewissen Grenzen eine Verschiebung zwischen Kessel und Rahmen zu. Der Kessel ist ölgefeuert. Die den Verbrennungsraum umschließende Feuerbüchse bildet mit dem diesen umgebenden Stehkessel einen wassergefüllten Hohlraum. An die Stehkesselvorderwand schließt sich der wassergefüllte Langkessel an. Dieser ist von waagrechten Rohren durchzogen. Die heißen Rauchgase durchströmen diese wasserumspülten Heiz- und Rauchrohre und gelangen über Rauchkammer und Schornstein ins Freie. Der im Steh- und Langkessel erzeugte Dampf sammelt sich im Dampfdom. Der dort entnommene Dampf strömt durch die in den Rauchrohren angeordneten, von Rauchgasen umströmten Überhitzerrohre. Über einen Heißdampf-Ventilregler gelangt der überhitzte Dampf zum Triebwerk.

Die 010 der DB besitzt eine Dreizylinder-Dampfmaschine. Zwei der mit dem Rahmen verschweißten Zylinder sind außerhalb und ein Zylinder ist im Rahmen angeordnet. Jeder der Kolben arbeitet über Kreuzkopf und Treibstange auf eine am Treibrad angebrachte Kurbel, die die hin und hergehende Bewegung des Kolbens in eine Drehbewegung umsetzt. Die drei Treibkurbeln sind um jeweils 120° gegeneinander versetzt. Die Treibachse ist beidseitig über eine Kuppelstange kraftschlüssig mit den Kuppelachsen verbunden. Die Steuerung der Dampfzufuhr zu den Zylindern erfolgt für jeden Zylinder getrennt nach dem Prinzip der Heusinger-Steuerung (Abb. 2). Bei dieser wird ein Kolbenschieber einerseits vom Kreuzkopf über Lenkerstange und Voreilhebel andererseits von einer am Treibrad befestigten Gegenkurbel angetrieben. Eine zwischen Gegenkurbel und Kolbenschieber angeordnete Schwinge erlaubt es, die Bewegungsrichtung des Kolbenschiebers umzusteuern. Befindet sich der Anschluß der Schieberzugstange unterhalb des Drehpunktes der Schwinge (Abb. 3 a schwarz), dann fährt die Lokomotive vorwärts. Bei Rückwärtsfahrt befindet sich der Anschluß der Schieberzugstange oberhalb des Drehpunktes der Schwinge (Abb. 3 a, rot). Durch Verschieben des Anschlusses der Schieberzugstange auf der Schwinge läßt sich außerdem der Hebelarm der Schwinge und somit der Weg der Schieberstange und des Schieberkolbens verändern. Damit kann die Dampffüllung des Zylinders geregelt werden. Hierzu ist die kreisbogenförmige Schwinge mit einer innenliegenden Gleitbahn (Kulisse) versehen, in der ein Gleitstein verschiebbar angeordnet ist. Mit dem Gleitstein ist die Schiebzugstange drehbar verbunden. Der Gleitstein kann über eine Verstellvorrichtung (Steuerstange) in der Schwingenführung verschoben und somit sein Abstand vom Drehpunkt der Schwinge verändert werden. Befindet sich der Gleitstein im Drehpunkt der Schwinge (Abb. 4), so nimmt der Kolbenschieber der Steuerung eine Mittelstellung ein und führt praktisch keine Bewegung aus. Infolge der Mittellage des Schiebers decken die beiden Kolben die Dampfzuführungsschlitze ab (Abb. 4).

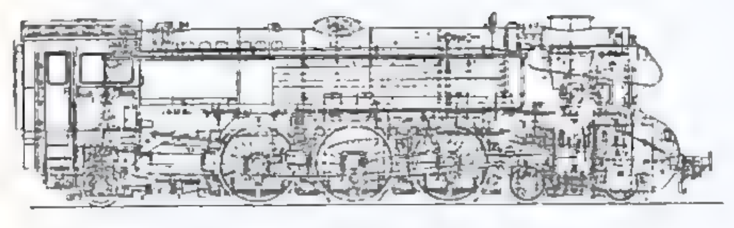


Abb. 1
Schnittbild der 010

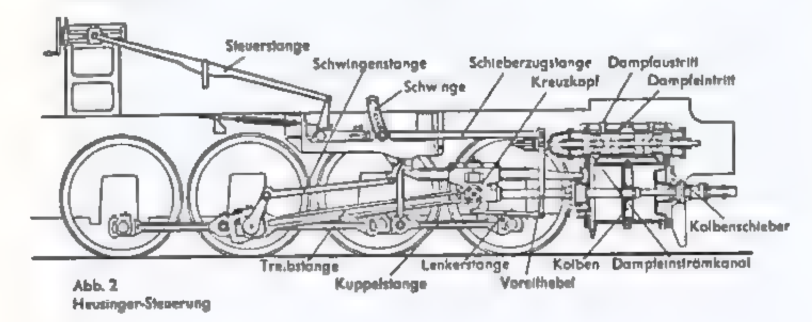


Abb. 2
Heusinger-Steuerung

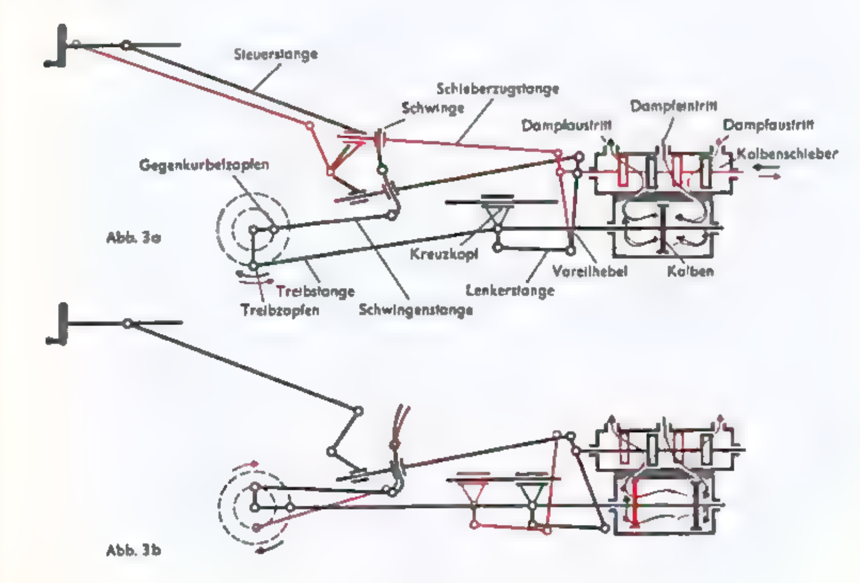


Abb. 3a

Abb. 3b

ELEKTROLOKOMOTIVE

Moderne Elektrolokomotiven sind Drehgestellfahrzeuge mit Einzelachsantrieb (Abb. 1 a). Die beiden Drehgestelle sind in Schweißkonstruktion hergestellte stabile Rahmen, in denen die Treibachsen senkrecht federnd, z. B. mit Achslenker geführt werden (Abb. 2). Jede Treibachse besitzt einen eigenen Antriebsmotor, der oberhalb der Treibachse angeordnet und im Drehgestellrahmen befestigt ist. Um das ungefederte Gewicht der Treibachsen klein zu halten, ist der Motor nicht starr mit der Treibachse verbunden. Ein einstufiges Stirnradgetriebe, das im Gehäuse des Elektromotors gelagert ist, setzt die hohe Motordrehzahl herab. Das abtriebsseitige Zahnrad, als Großrad bezeichnet, umschließt mit ausreichendem Abstand die Achswelle der Treibachse. Die kraftschlüssige, senkrechte Federbewegung der Treibachse zulassende Verbindung zwischen Großrad und Treibachse erfolgt z. B. mittels des „Gummiring-Kardan-Antriebes". Dabei umschließt eine Hohlwelle die Treibachse. Das eine Ende dieser Kardanwelle endet in sternförmig angeordneten Mitnehmern, die über eine in Segmente unterteilte Gummiringfeder elastisch mit einem Treibrad verbunden ist. Am gegenüberliegenden Ende der Kardanhohlwelle greifen sechs gleichmäßig am Umfang verteilte mit dem Großrad verbundene Lenker an. Das an beiden Enden schwenkbar gelagerte Lenkersystem ermöglicht die Vertikalbewegung der Hohlwelle. Im Drehgestell befindet sich dann außerdem noch die Bremseinrichtung, bestehend aus der pneumatisch betätigten, an den Radreifen jeder Treibachse angreifenden Klotzbremse und aus der Magnetscheibenbremse.

Die auf dem Dach der Elektrolokomotive angeordneten Scherenstromabnehmer stellen die elektrische Verbindung zwischen der Fahrleitung und der elektrischen Anlage her (Abb. 3). Sie gleichen selbständig unterschiedlichen Abstand zwischen Lokomotive und Fahrleitung aus. Geschwindigkeit und Zugkraft der Wechselstrom-Elektrolokomotive werden innerhalb der Leistungsgrenze über die Motorspannung geregelt. Hierzu wird die Fahrdrahtspannung von 15 000 V in einem in der Lokomotive angeordneten Transformator herabgeregelt. Dazu weist der Transformator der Schnellzuglokomotive 103 der DB z. B. 39 Anzapfungen und damit 39 Fahrstufen auf. Diese Anzapfungen liegen, bedingt durch die hohe zu schaltende Leistung, im Primär- oder Hochspannungsteil des Transformators. Die Anzapfungen sind mit einem Kreisbahnwähler (Doppelkontaktschaltwerk) verbunden, bei dem die einzelnen Kontakte raumsparend kreisförmig angeordnet sind. Eine zeitweilige Unterbrechung der Zugkraft vermeidet man durch zwei getrennte Schaltkontakte im Schaltwerk. Beim Umschalten der Fahrstufe eilt ein Schaltkontakt spannungslos auf den Kontakt der nächsten Anzapfung voraus und wird darauf, z. B. mittels eines elektronischen Schalters, in Bruchteilen einer Sekunde eingeschaltet und die vorhergehende Anzapfung entsprechend abgeschaltet. Dieses Schaltwerk bildet mit dem Transformator eine Einheit, die ölgekühlt ist. Das Schaltwerk wird durch einen elektrischen Stellmotor angetrieben. Das Einstellen der Fahrstufen geschieht ferngesteuert vom Führerstand aus mittels eines Handrades. Die gewünschte Fahrstufe wird vorgewählt. Der Antrieb des Schaltwerks schaltet, gesteuert von der Leistungsaufnahme der Fahrmotoren, so lange von Anzapfung zu Anzapfung weiter, bis die gewünschte Fahrstufe eingestellt ist.

Die 103 der DB (Abb. 3) hat sechs parallelgeschaltete Fahrmotoren mit jeweils einer Leistung von ca. 1600 PS. Die maximal zulässige Motorspannung beträgt ca. 600 V. Die Motoren elektrischer Bahnen müssen beim Anfahren aus dem Stillstand ein hohes Anfahrmoment aufweisen. Dies erreicht man, wenn im Motor die Wicklungen des Läufers und des Ständers in Serie hintereinandergeschaltet sind (Abb. 3). Wechselstrom-Elektrolokomotiven haben daher vielpolige Einphasen-Reihenschluß-Kommutatormotoren.

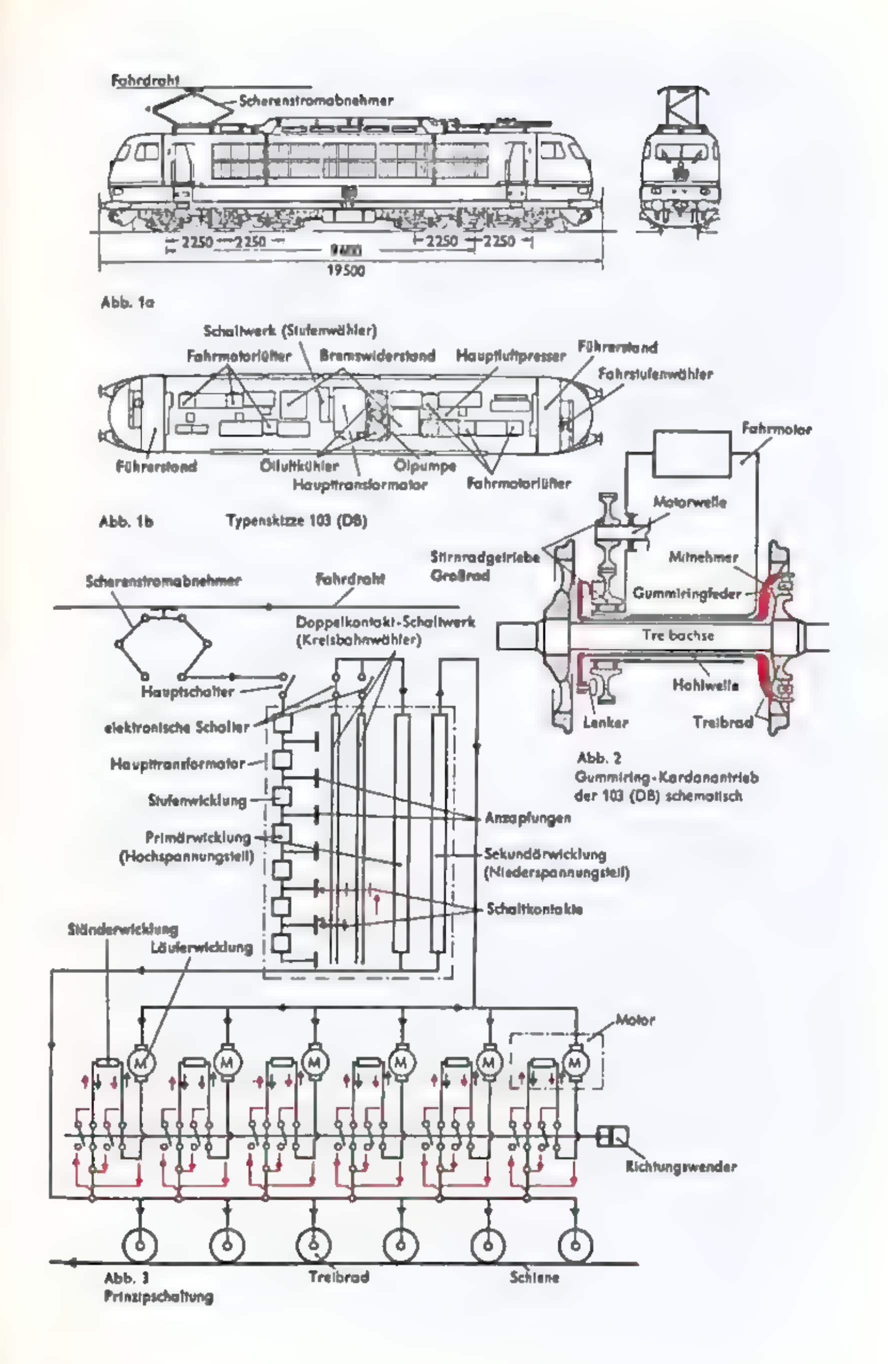


Abb. 1a

Abb. 1b Typenskizze 103 (DB)

Abb. 2 Gummiring-Kardanantrieb der 103 (DB) schematisch

Abb. 3 Prinzipschaltung

DIESELLOKOMOTIVE

Die Diesellokomotive ist ein Triebfahrzeug, bei dem ein oder zwei Dieselmotoren die im mitgeführten Kraftstoff enthaltene chemische Energie über die Verbrennung in Zylindern in mechanische Arbeit umwandeln. Die Diesellokomotive wird auf nichtelektrifizierten Strecken eingesetzt und verdrängt dort immer mehr die Dampflokomotive.

Mit Ausnahme der langsamfahrenden Rangierlokomotive sind alle Dieselmotoren der Deutschen Bundesbahn (DB) als zwei- bzw. dreiachsige Drehgestellmaschinen ausgeführt. Durch die Anordnung der Treibachsen in Drehgestellen lassen sich bessere Laufeigenschaften bei hoher Geschwindigkeit erzielen. Den prinzipiellen Aufbau der bei der DB im Reisezug- und mittleren Güterzugdienst häufig eingesetzten Diesellokomotive der Reihe 216 zeigt Abb. 1. Jeweils zwei Treibachsen sind in einem Drehgestell federnd angeordnet. Das Drehgestell ist ein in Schweißkonstruktion hergestellter Rahmen. Es nimmt neben den Treibachsen und dem zugehörigen Achstrieb die zu jedem Treibrad gehörende Klotzbremse auf. Auf den beiden Drehgestellen stützt sich mit kräftigen Schraubenfedern brückenartig der Lokomotivaufbau ab. Die Schraubenfedern (Flexicoil) lassen bei Kurvenfahrt gegenüber dem Lokomotivkasten auftretende Querbewegung der Drehgestelle zu. Die kraftschlüssige, jedoch die Schwenkbewegung zulassende Verbindung zwischen Drehgestell und Lokomotivrahmen stellt ein im Drehgestell tief angelenkter dornartiger Drehzapfen (Abb. 2) her. Stoßdämpfer, zwischen Drehgestell und Rahmen angeordnet, dämpfen senkrecht und quer verlaufende Schwingungen des Drehgestells.

Der Lokomotivaufbau besitzt an beiden Enden einen Führerstand. Der Aufbau besteht aus einem kräftigen Rahmen in Schweißkonstruktion zur Aufnahme der Zug- und Druckkräfte des Zugdienstes und der Biegekräfte und aus dem mittragenden Kastenaufbau, der mit dem Rahmen verschweißt ist.

Diesellokomotiven sind mit rasch laufenden, mittels Abgasturbolader aufgeladenen Dieselmotoren ausgerüstet, die bei kleinen Abmessungen eine hohe Leistung erreichen. Im Lokomotivrahmen der 216 der DB ist ein 16-Zylinder-4-Takt-Dieselmotor in V-Form eingebaut, der bei einer Drehzahl von 1500 U/min eine Leistung von 2000 PS entwickelt. Im Gegensatz zum Elektromotor oder zur Dampfmaschine läuft der Dieselmotor nicht unter Last an. Er entwickelt seine volle Leistung außerdem nur bei entsprechender Nenndrehzahl. Eine starre Verbindung zwischen Motor und den Treibachsen ist daher nicht möglich. Die Diesellokomotiven der DB sind mit hydraulischer Kraftübertragung ausgerüstet. Bei der 216 ist etwa in Mitte des Fahrzeugrahmens ein hydrodynamisches Getriebe angeordnet und über eine Gelenkwelle kraftschlüssig mit der Antriebsmaschine verbunden. Die hydraulische Kupplung stellt die direkte Verbindung her. Bei Gangwechsel wird der hinzugeschaltete Wandler oder die Kupplung mit Hilfe der Füllpumpe mit Öl gefüllt, der abgeschaltete Teil von Öl entleert. Dem hydrodynamischen Getriebe sind ein mechanisches Wendegetriebe und zwei mechanische Stufengetriebe für Langsam- und Schnellfahrt nachgeschaltet. Die Abtriebsseite des Getriebes ist beidseitig über eine Gelenkwelle mit der jeweils nächstgelegenen Treibachse der beiden Drehgestelle kraftschlüssig verbunden. Dabei wird im Vorgelegachstrieb (Abb. 3) die hohe Antriebsdrehzahl reduziert. Eine weitere Gelenkwelle verbindet jeweils die beiden Vorgelegachstriebe eines Drehgestells (Abb. 1). Im Lokomotivaufbau sind unter anderem noch die Kühlanlage für den Verbrennungsmotor, die Luftpresseranlage für das Bremssystem, das Heizaggregat sowie alle erforderlichen Steuerungseinrichtungen untergebracht.

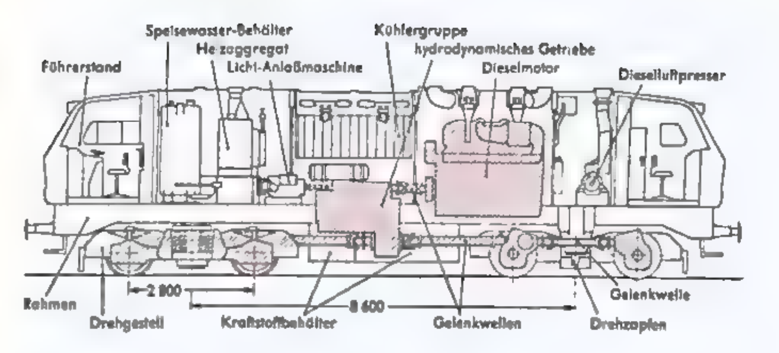


Abb. 1
Diesellokomotive Reihe 216

Abb. 2

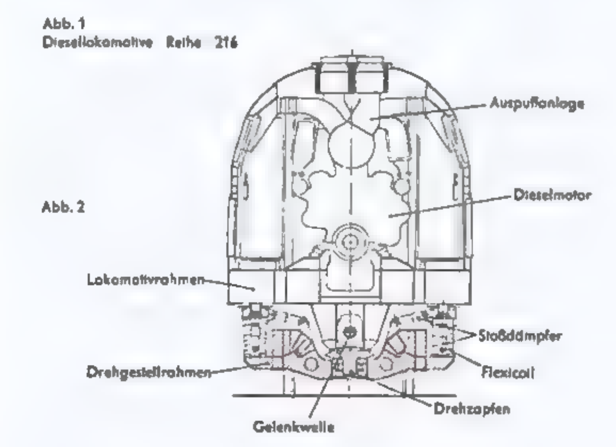
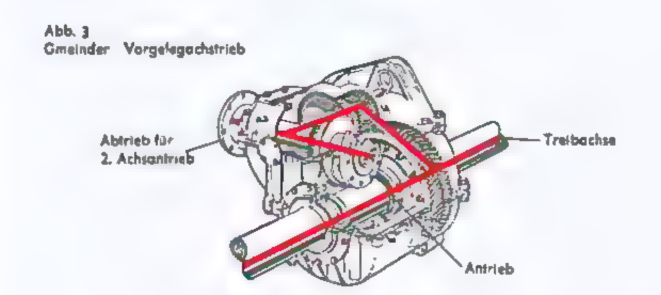


Abb. 3
Gmeinder Vorgelegachstrieb



EISENBAHNBREMSE I

Die einfachste Bremse ist die Handbremse. Sie dient als Feststellbremse abgestellter Fahrzeuge und wird mechanisch betätigt. Um fahrende Eisenbahnfahrzeuge abzubremsen, benutzt man Druckluft als Hilfskraft. Gelangt Druckluft in einen mit einem beweglichen Kolben abgeschlossenen Zylinder, so wird infolge des Bestrebens der Druckluft, sich auszudehnen, eine Kraft auf den Kolben ausgeübt und der Kolben bewegt. Bei der Druckluftbremse ist der Kolben über ein Hebelsystem mit den Bremsklötzen verbunden (Abb. 1). Eine im Bremszylinder angeordnete Druckfeder sorgt dafür, daß sich bei gelöster Bremse der Kolben in seiner Ausgangslage befindet und die Bremsklötze von dem Radreifen abstehen.
Würde Druckluft direkt über ein Leitungssystem zum Bremszylinder jedes Fahrzeuges gelangen (direkte Bremse), so könnte bei einer Undichtigkeit die Bremsanlage des ganzen Zuges ausfallen. Dies wird bei der indirekten Bremse verhindert, bei der Druckabsenkung in der Luftleitung, die alle Fahrzeuge miteinander verbindet (Hauptluftleitung), die Bremsanlage jedes Fahrzeuges steuert. Hierzu ist in jedem Fahrzeug zusätzlich ein Steuerventil und ein Hilfsluftbehälter als Luftreservoir erforderlich (Abb. 2).
Auf dem Triebfahrzeug wird Druckluft von ca. 8 atü erzeugt und in zwei Hauptluftbehältern gespeichert. Im Führerstand der Lokomotive befindet sich als Regelorgan der Bremsanlage das Führerbremsventil, das die Druckluft von ca. 8 atü auf den Regelbetriebsdruck von 5 atü reduziert und der Hauptluftleitung zuführt. Die Hauptluftleitung der zusammengekuppelten Fahrzeuge ist durch mit Schnellkupplung versehene Druckschläuche verbunden. Bei gelöster Bremse besteht Druckausgleich zwischen Hauptluftleitung und Hilfsluftbehälter. Zum Auslösen der Bremse wird das Führerbremsventil betätigt, das die Verbindung zwischen Hauptluftbehälter und Hauptluftleitung unterbricht und aus letzterer Luft ins Freie entweichen läßt (Abb. 3). Der Druck im Hilfsluftbehälter jedes Fahrzeuges übersteigt den der Hauptluftleitung. Dieser Druckunterschied schiebt den Kolben im Steuerventil nach oben. Der Kolben sperrt die Hauptluftleitung vom Hilfsluftbehälter ab und verbindet letzteren mit dem Bremszylinder, in den Druckluft einströmt. Sinkt während des Bremsvorganges der Druck im Hilfsluftbehälter unter den der Hauptluftleitung, so bewegt sich der Kolben im Steuerventil etwas nach unten und sperrt die Luft im Bremszylinder ein (Bremsabschlußstellung, Abb. 4). Bei abermaliger Senkung des Druckes in der Hauptluftleitung wiederholt sich der beschriebene Bremsvorgang. Die Bremskraft wächst weiter an. Die stufenweise Erhöhung der Bremskraft durch stufenweise Drucksenkung in der Hauptluftleitung ist solange möglich, bis in der Hauptluftleitung und im Hilfsluftbehälter derselbe Druck herrscht.
Der Bremsvorgang wird beendet, wenn durch entsprechende Stellung des Führerbremsventils wieder Druckluft aus dem Hauptluftbehälter in die Hauptluftleitung gelangt. Infolge des gegenüber dem Hilfsluftbehälter entstehenden Überdruckes fährt der Kolben im Steuerventil in seine untere Endlage (Abb. 2) und verbindet Hauptluftleitung mit Hilfsluftbehälter, der aufgefüllt wird. Gleichzeitig entweicht die Preßluft aus dem Bremszylinder ins Freie. Dieser Lösevorgang der Bremse läßt sich nicht unterbrechen. Reicht die Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Bremsungen nicht aus, um den Hilfsluftbehälter jeweils wieder aufzufüllen, so sinkt der Druck in diesem immer mehr ab, bis der Druck der Luft zum Bremsen nicht mehr ausreicht und die Bremse erschöpft ist.
Tritt eine Undichtigkeit in der Hauptluftleitung z. B. durch Platzen oder Abreißen des Druckschlauches ein, so bewirkt die durch die Entleerung der Hauptluftleitung eintretende Drucksenkung ein selbsttätiges Ansprechen der Bremse. Im gleichen Sinne wirkt die in jedem Fahrzeug zur Personenbeförderung vorgesehene Notbremse (Abb. 3).

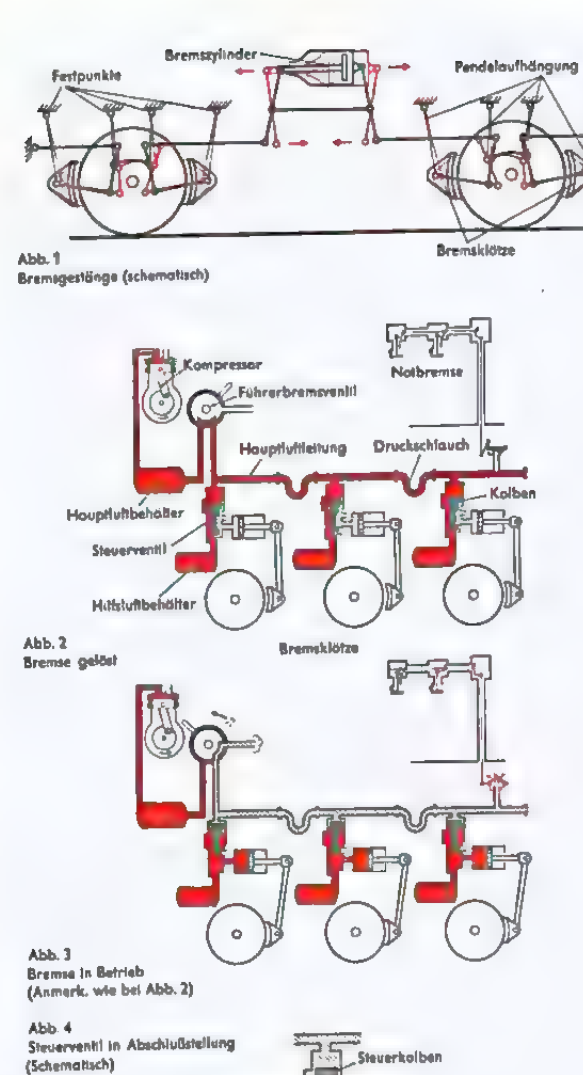


Abb. 1
Bremsgestänge (schematisch)

Abb. 2
Bremse gelöst

Abb. 3
Bremse in Betrieb
(Anmerk. wie bei Abb. 2)



Abb. 4
Steuerventil in Abschlußstellung
(Schematisch)

EISENBAHNBREMSE II

Die Wirkungsweise der Eisenbahnbremse wird im wesentlichen von der Ausführung des Steuerventils bestimmt. Das von Knorr entwickelte Steuerventil KE ist in verschiedenen Bauformen bei allen modernen Fahrzeugen der DB eingebaut. Es läßt das stufenweise Lösen der Bremse zu. Die damit ausgerüstete Bremsanlage ist unerschöpflich. Das Steuerventil KE (Abb. 1) baut sich prinzipiell aus drei Elementen auf. Das Dreidruckventil läßt einen stufenweisen Druckanstieg oder eine stufenweise Drucksenkung in einem Zwischenbehälter C_V zu, dessen Druck das Relaisventil auf den Bremszylinder C überträgt. Das Dreidruck-Füllventil F bewirkt das Auffüllen des Vorratsluftbehälters R, wenn der Druck in diesem unter den der Hauptluftleitung L gesunken ist. Der Bremszylinder C ist drucklos, die Bremse gelöst, wenn der Druck in der Hauptluftleitung L 5 atü beträgt. Dieser Druck herrscht infolge des offenen Ventils 16 in der Steuerkammer A, die durch eine dichte, bewegliche Membran von der Kammer B getrennt ist. In dieser steht der gleiche Druck an. Der Dreidruckkolben 1 befindet sich in seiner unteren Lage. Da L-Druck über das offene Ventil 16 die Membran 22 des Dreidruck-Füllventils F beaufschlagt, befindet sich der Dreidruckkolben in seiner oberen Endlage. Der Hilfsluftbehälter R ist somit über das geöffnete Ventil 19 und über die Dichtklappe 21 des Füllventils F mit L-Druck beaufschlagt. R-Druck steht am geschlossenen Ventilteller 9 des Dreidruckventils und am geschlossenen Ventil 24 des Relaisventils an. Die Membran 26 befindet sich in seiner unteren Endlage, wodurch C durch den offenen Auslaß 25 entlüftet ist.

Zum Auslösen der Bremse wird der L-Druck abgesenkt (Abb. 2). Auf die Membran 22 des Dreidruck-Füllventils F wirkt von unten nur noch der abgesenkte R-Druck (Ventil 16 ist zunächst noch offen), wodurch unter dem höheren R-Druck der Kolbensatz 20 von Federkraft unterstützt nach unten fährt. Die Verbindung zwischen R und L ist unterbrochen. Die Druckabnahme in L läßt ferner den Nadelkolben 16 a unter Federdruck nach oben gehen. Infolge des stark verengten Querschnitts der noch offenen Düse 16 kann sich der Druck in Kammer A nicht so schnell wie in Kammer B mit dem L-Druck ausgleichen. Unter dem höheren A-Druck geht der Kolben 1 des Steuerventils nach oben. Die entlastete Steuerhülse 4 schließt mit Federdruck Auslaß 3 und B-Luft kann über 5 (Ü-Kammer) der noch offenen Düse 13 a und Düse 13 ins Freie strömen. Durch die Drosselung von 1 a sinkt der B-Druck schnell ab und der Kolben 1 fährt in die obere Endlage. Durch das Anheben der Ventilplatte 9 strömt R-Luft über Düse 10 in die C_V- und D-Kammer. Die Membran 26 des Relaisventils geht nach oben, wodurch Auslaß 25 schließt und R-Luft über 24 in den Bremszylinder C gelangt. Hat sich, nachdem Kolben 12 Auslaß 13 a verschlossen hat, der B-Druck mit L ausgeglichen, so sinkt unter dem auf Membran 7 einwirkenden C_V-Druck Kolben 1 etwas nach unten. Der Ventilteller 9 schließt, ohne daß Auslaß 8 öffnet (Abb. 3). Das Relaisventil schließt Einlaß 24, ohne Auslaß 25 zu öffnen, sobald der C-Druck dem C_V-Druck entspricht. Eine Abnahme des C_V-Druckes bzw. des Bremszylinderdruckes C hat denselben Effekt, als würde der L-Druck weiter abgesenkt. Die entsprechenden Kolben gehen infolge des gestörten Gleichgewichtes nach oben. R-Luft strömt solange nach, bis der jeweilige Kolben wieder seine Abschlußstellung einnimmt. Sinkt der R-Druck unter den L-Druck, legt der höhere L-Druck die Membran 21 nach unten, öffnet den Einlaß, und L-Luft strömt über 19 a bis zum Druckausgleich nach R.

Zum stufenweisen Lösen der Bremse steigt der L-Druck und damit der Druck in Kammer B an. Der Kolben 1 geht aus der Abschlußstellung nach unten. Auslaß 8 öffnet und C_V-Luft entweicht über 6 solange ins Freie, bis die auf die Membran 2 und 7 einwirkenden Druckkräfte im Gleichgewicht sind, wodurch Kolben 1 etwas nach oben gleitet und Auslaß 8 schließt (Abb. 3).

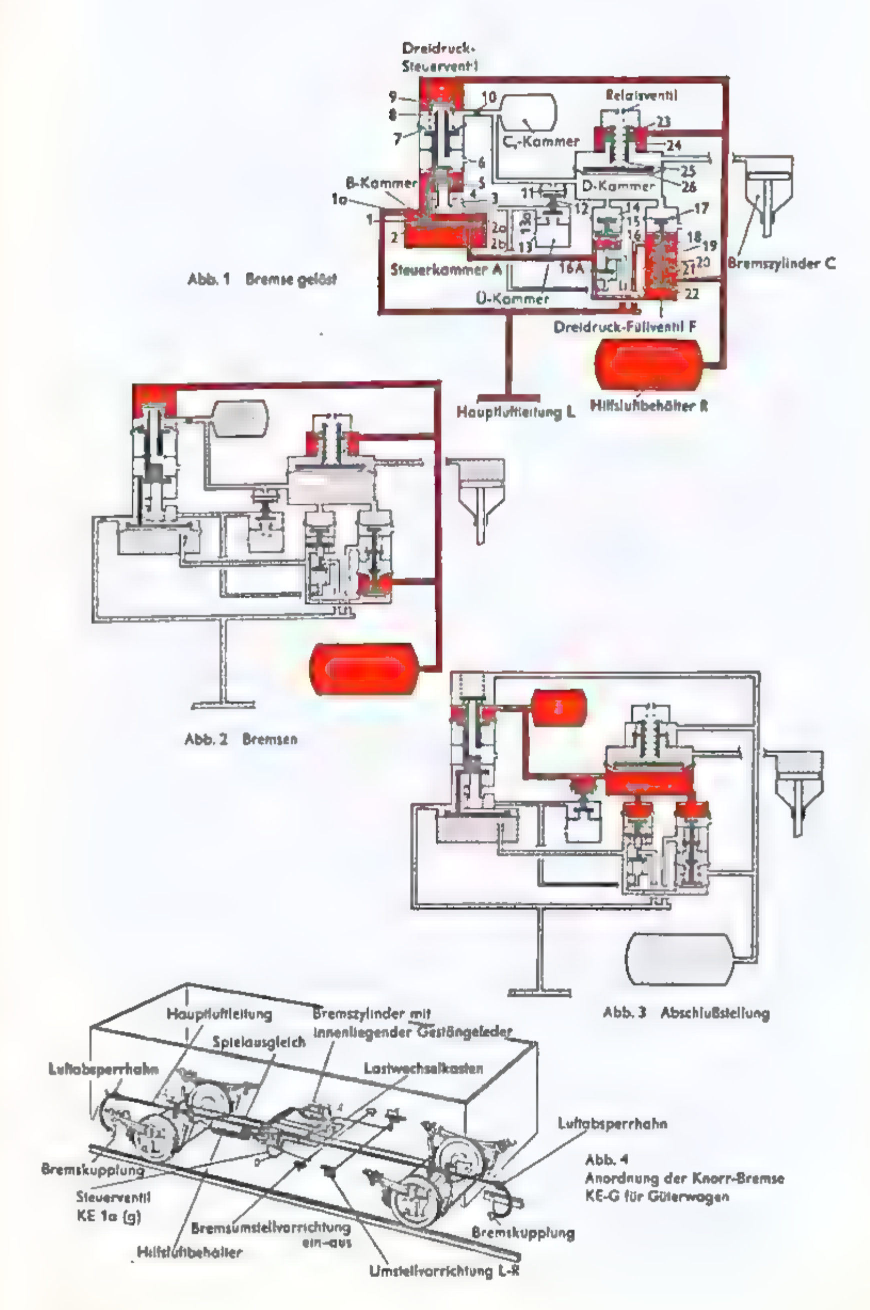


Abb. 1 Bremse gelöst

Abb. 2 Bremsen

Abb. 3 Abschlußstellung

Abb. 4 Anordnung der Knorr-Bremse KE-G für Güterwagen

SICHERHEITSEINRICHTUNGEN

Die *Sicherheitsfahrschaltung (Sifa)*, Führerüberwachungseinrichtung oder Totmanneinrichtung ist eine Sicherheitsanlage auf Triebfahrzeugen mit Einmannbetrieb, bei der die Dienstfähigkeit des Fahrzeugführers fortgesetzt überwacht wird. Hierzu muß der Fahrzeugführer eine Wachsamkeitstaste (Schaltknopf), einen Fußtritt oder die Fahrkurbel herunterdrücken. Dadurch wird der Stromkreis zum Elektromagneten im Führerüberwachungsventil unterbrochen (Abb. 1). Wird durch Loslassen z. B. der Kurbel der Stromkreis geschlossen, so fließt der Strom durch die Wicklung des Elektromagneten im Führerüberwachungsventil. Die Wicklung des Elektromagneten zieht einen Eisenkern herab, der ein Ventil umschaltet, das die Verbindung zwischen Hauptluftbehälter und Führerbremsventil unterbricht. Gleichzeitig wird im Führerüberwachungsventil eine Öffnung freigegeben, durch die Druckluft aus der Hauptluftleitung entweichen kann. Infolge der Druckabsenkung in der Hauptluftleitung spricht die Bremse (s. Eisenbahnbremse) an. Damit die Sifa auch arbeitet, wenn im Ohnmachtsfall der Fahrzeugführer auf die Taste oder Kurbel fällt, weist die Sifa noch eine Wachsamkeitskontrolle auf. Dabei muß der Fahrzeugführer z. B. alle 50 s die Fahrkurbel oder Wachsamkeitstaste mindestens einmal für etwa 0,5 s loslassen. Geschieht dies nicht, dann leuchtet eine Meldelampe auf. Ist darauf die halbe Zeit bis zur Auslösung der Zwangsbremse abgelaufen, ertönt ein Summer. Mit dem Auslösen der Zwangsbremsung ist das Abschalten der Antriebe des Triebfahrzeuges verbunden.

Die *induktive Zugbeeinflussung (Indusi)* verhindert, daß durch Unachtsamkeit des Fahrzeugführers ein „Halt" zeigendes Signal überfahren wird. Die Indusi ist bei der DB auf allen Strecken, die eine höhere Geschwindigkeit als 120 km/h zulassen, zwingend vorgeschrieben. Die Indusi arbeitet bei der DB mit einem Drei-Frequenz-Wechselstrom-Resonanzsystem. Die mit Indusi ausgerüsteten Triebfahrzeuge sind mit einer „Empfangsanlage" ausgestattet, die im wesentlichen einen Schwingkreis darstellt. Dieser ist auf die drei Frequenzen 500, 1000 und 2000 Hertz abgestimmt. Durch entsprechend abgestimmte Schwingkreise an der Strecke, kann der Empfangsanlage infolge Resonanz Energie entzogen werden. Bei 1000 Hertz (Hz) wird am Vorsignal die Wachsamkeit des Fahrers geprüft (Abb. 2). Bei bestimmtem Abstand vor dem Haltsignal kontrolliert der 500-Hz-Schwingkreis die Fahrzeuggeschwindigkeit. Der am Hauptsignal angeordnete 2000-Hz-Schwingkreis löst beim Überfahren eines „Halt" gebietenden Hauptsignales die Zugbremse aus. Die Indusi besteht im wesentlichen aus dem neben dem Gleis angebrachten Gleismagnet und aus dem am Fahrzeug angeordneten Fahrzeugmagnet (Abb. 3). Der Gleismagnet baut sich aus einer auf einem Eisenkern-Magnetjoch angebrachten Spule und aus einem parallel dazu geschalteten Kondensator auf (Abb. 4). Die drei Lokomotivschwingkreise bestehen aus entsprechenden Spulen mit Kondensator und der Wicklung eines elektromagnetischen Schalters (Abb. 4). Der Lokomotivschwingkreis, der für 2000 Hz vereinfacht dargestellt ist, wird z. B. von einem Hochfrequenzdynamo gespeist. Arbeitet der Hochfrequenzdynamo, so fließt ein begrenzter Strom durch den Lokomotivschwingkreis. Der Schaltanker im Hochfrequenzrelais ist angezogen, wodurch die Magnetwicklung des 24-Volt-Relais stromdurchflossen und dessen Schaltanker angezogen ist. Dadurch ist der Stromkreis zum Führerüberwachungsventil unterbrochen. Überfährt der Fahrzeugführer z. B. ein „Halt" gebietendes Hauptsignal, so wird bei der Vorbeifahrt der Signalschwingkreis infolge Resonanz erregt. Dabei entzieht er dem Lokomotivschwingkreis soviel Energie, daß das Hochfrequenzrelais den Schaltanker nicht mehr halten kann und abfällt. Damit wird das 24-Volt-Relais stromlos und dessen Schaltanker fällt ebenfalls ab. Als Folge schließt sich der Stromkreis zum Führerüberwachungsventil, wodurch die Zwangsbremsung eingeleitet und der Antrieb abgeschaltet wird.

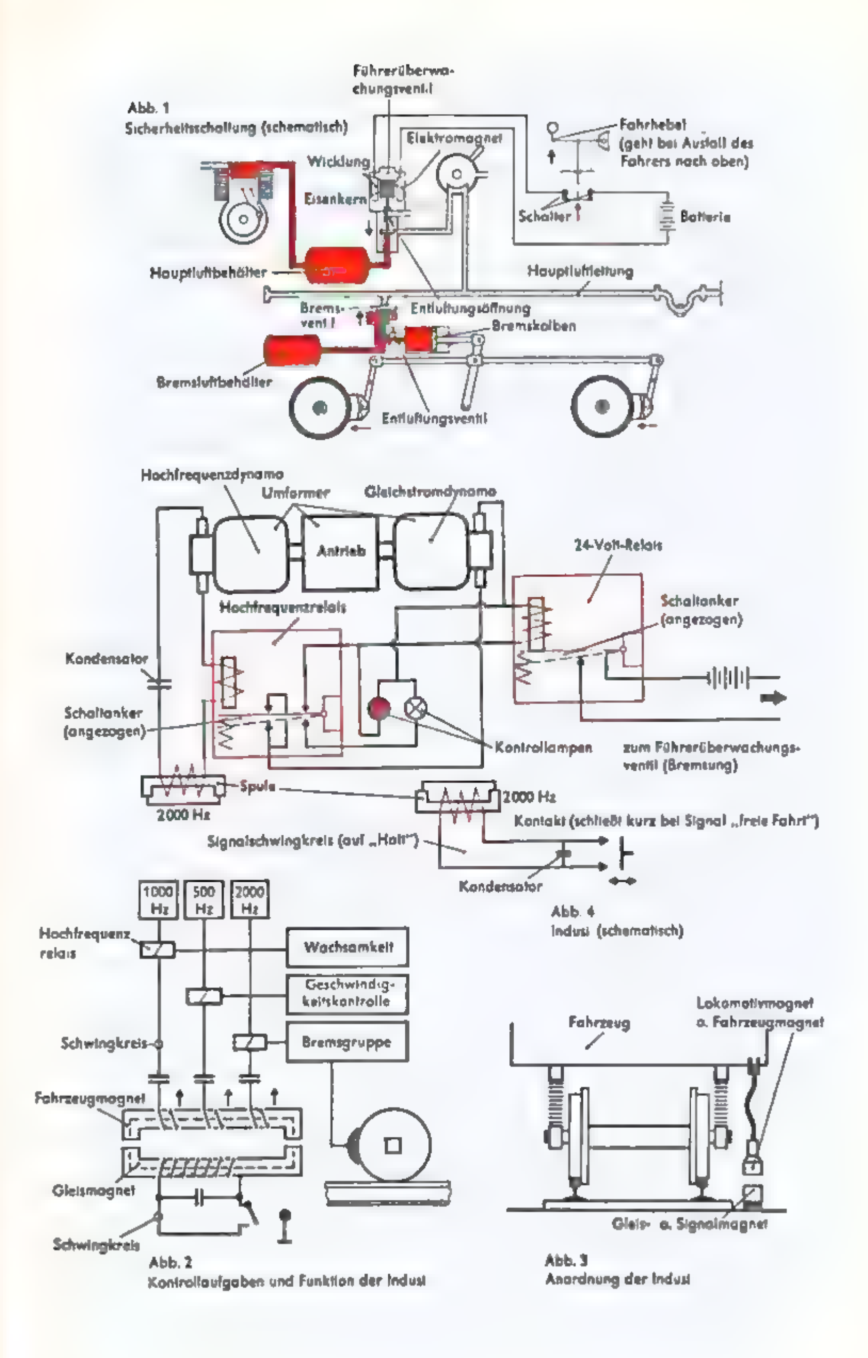


Abb. 1 Sicherheitsschaltung (schematisch)

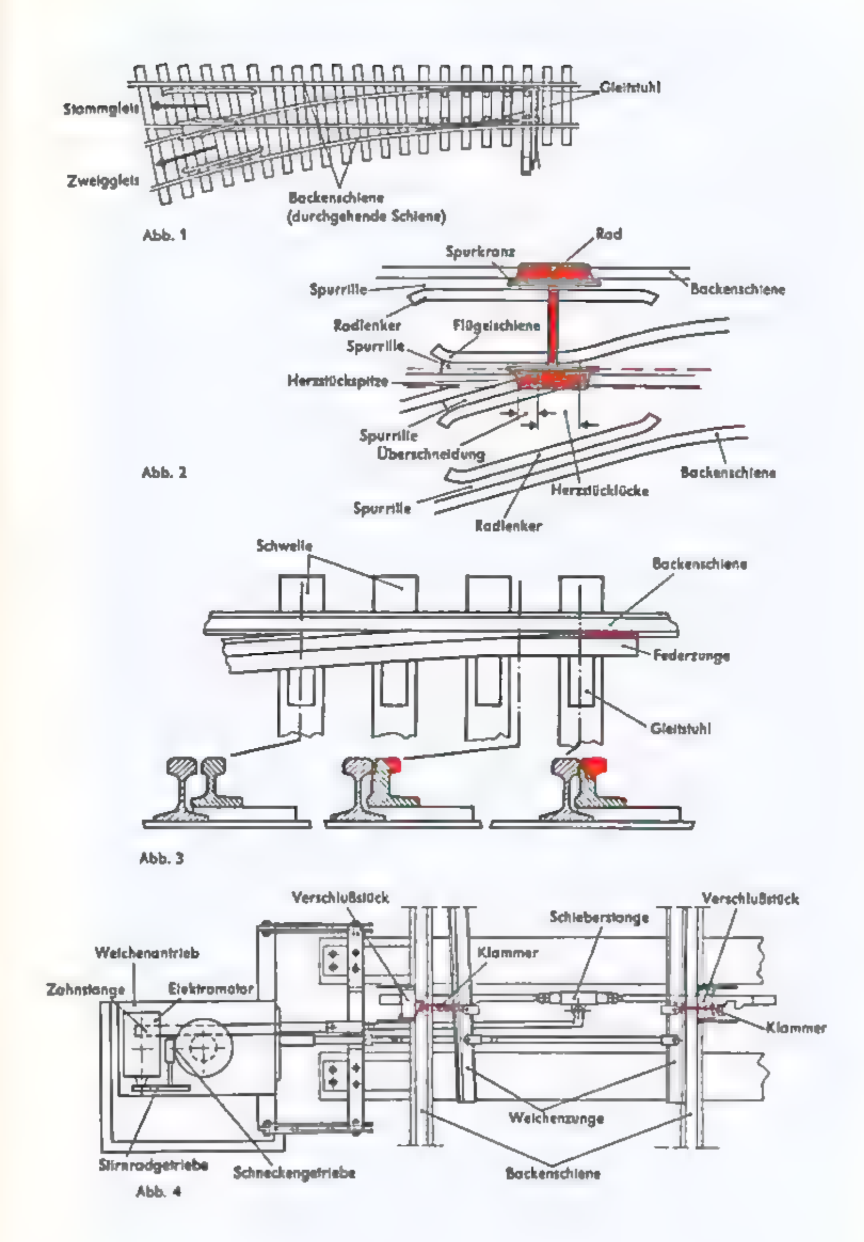
Abb. 4 Indusi (schematisch)

Abb. 2 Kontrollaufgaben und Funktion der Indusi

Abb. 3 Anordnung der Indusi

WEICHE

Die Weiche ist ein Teil der Gleisanlage. Sie ermöglicht das Überleiten der Schienenfahrzeuge von einem Gleis zum anderen ohne Fahrtunterbrechung. Die einfache Weiche (Abb. 1) besteht aus dem gerade verlaufenden Stammgleis und aus dem davon abzweigenden Zweiggleis. Die beiden äußeren, die Weiche einschließenden Backenschienen sind durchgehend ausgeführt. Die mit den Weichenzungen beginnenden Schienen der Weiche kreuzen sich. Soll das Stammgleis befahren werden, so schmiegt sich die gerade verlaufende Weichenzunge an die durchgehende, in das Zweiggleis abbiegende Backenschiene an (Abb. 1 rot). Die gegenüberliegende, gebogene Weichenzunge liegt ausreichend weit von der geraden Backenschiene ab, so daß eine Rille für den Spurkranz des Fahrzeugrades frei bleibt und ein gerades Gleis entstanden ist. Wo sich die weicheninneren Schienen des geraden und abbiegenden Gleises kreuzen ist eine Lücke für den Spurkranz der Fahrzeugräder freigelassen (Abb. 2). Die Weichenzungen gehen in die das Herzstück umschließenden Flügelschienen über. Die Flügelschienen bilden gemeinsam mit der Herzstückspitze im Bereich der Herzstücklücke infolge Überschneidung eine durchgehende Auflage für die Lauffläche des Rades. In der Herzstücklücke ist die Führung des Spurkranzes unterbrochen. Die Flügelschiene und ein in gleicher Höhe an der Innenseite mit entsprechendem Abstand von der Backenschiene angebrachter Radlenker führen in diesem Bereich die Innenflächen der Laufräder. Für die Fahrt in das Zweiggleis liegt die gebogene Weichenzunge an der geraden Backenschiene an, während die gerade Weichenzunge von der gebogenen Backenschiene ausreichend weit abliegt. Dadurch entsteht ein durchgehendes gebogenes Gleis (Abb. 1 schwarz).
Weichen werden allgemein mit federnd verbiegbarer Zunge ausgeführt. Die Zunge wird auf mit den Schwellen verschraubten Gleitstühlen verschoben (Abb. 3). Damit die frei aufliegende Schiene unter der Radlast nicht kippt, ist der Schienenfuß besonders breit ausgebildet. Der Schienenkopf der Zunge schmiegt sich in dem Bereich, in dem er an der Backenschiene anliegt, lückenlos an den Kopf der Backenschiene an. Die davon abgewandte Seite des Zungenkopfes läuft, von oben besehen, keilförmig zur Zungenspitze hin aus (Abb. 3).
Der Spitzenverschluß bewirkt das sichere Anliegen der Zungenspitze an der Backenschiene. Er verhindert ungewolltes Verstellen der Zunge und ermöglicht beschädigungsfreies Auffahren falsch gestellter Weichen von der Herzstückspitze her. Der sehr häufig verwendete Klammerspitzenverschluß (Abb. 4) besteht aus der mit dem Weichenantrieb verbundenen Schieberstange. Diese liegt auf dem Boden der beiden jeweils unter der Backenschiene angebrachten kastenförmigen Verschlußstücke auf. Parallel zur Schieberstange liegt in jedem Verschlußstück eine Klammer, die drehbar jeweils mit einer Weichenzunge verbunden ist. Bei der anliegenden Weichenzunge schaut dann der keilförmig ausgebildete Kopf der zugehörigen Klammer aus dem Verschlußstück heraus. Der Rücken der Schieberstange preßt die Klammer zur Seite. Infolge der keilförmigen Fläche des Klammerkopfes und der Verschlußstück-Stirnseite zieht die Klammer die Zunge kräftig an die Backenschiene heran. Die Klammer der abliegenden Weichenzunge ist in einem Einschnitt in der Schieberstange eingerastet. Die Wand des Verschlußstückes verhindert das Ausklingen der Klammer.
Beim Umstellen der Weiche geht die Schieberstange nach rechts. Die abstehende Zunge wird mitgenommen und an die Backenschiene angelegt. Dabei zieht die Schieberstange die zugehörige Klammer aus dem Verschlußstück heraus. Der keilförmige Klammerrücken rutscht aus dem Einschnitt der Schieberstange heraus. Im Verlauf der weiteren Stellbewegung gleitet der Rücken der Schieberstange am Klammerrücken entlang und verkeilt die Klammer an der abgeschrägten Stirnfläche des Verschlußstückes.



STELLWERK I

Das Stellwerk ist eine technische Anlage der Eisenbahn, in der alle Vorrichtungen und Einrichtungen zusammengefaßt sind, um den Weg eines Zuges, die Fahrstraße, durch Betätigen von Weichen, Kreuzungsweichen und Signalen einzustellen und freizugeben. Falsche Weichenstellung oder Verstellen einer Weiche, während Eisenbahnfahrzeuge über diese hinwegrollen, führt zum Zusammenstoß oder zum Entgleisen. Daher sind im Stellwerk Einrichtungen vorhanden, die ein beliebiges Einstellen von Weichen und Signalen durch entsprechende Sperren (Verriegelungen) verhindern. Mit dem Hauptsignal kann erst dann eine Fahrstraße freigegeben werden, wenn alle zugehörigen Weichen und Kreuzungsweichen richtig gestellt sind. Außerdem muß dieser Strecken- oder Blockabschnitt frei von einem voraus- oder entgegenfahrenden Zug sein. Diese zusätzliche Sicherung, die Blockeinrichtung, bringt die die Strecken- oder Blockabschnitte sichernden Signale in gegenseitige Abhängigkeit. Beim Bahnhofsblock unterliegt die Freigabe einer Fahrstraße dem Fahrdienstleiter.

Mechanisches Stellwerk: Das Stellen der Weichen, Kreuzungsweichen und Signale erfolgt beim mechanischen Stellwerk manuell auf mechanischem Wege. Ebenso wird die Abhängigkeit von Weichenlage, Fahrstraße und Signalstellung mechanisch bewirkt. Das Stellen der Weichen etc. erfolgt mit Stellhebeln, die in einem Abstand von ca. 20 cm auf der Hebelbank im Stellwerk aufgereiht sind (Abb. 1). Jeder Stellhebel ist mit einer Seilscheibe verbunden, über die ein Drahtzug geschlungen ist. Dieser doppelte Drahtzug, mittels Seilrollen geführt und entsprechend gespannt, stellt die mechanische Verbindung zwischen Stellhebel und Weiche oder Signal her. Mit dem Spannwerk werden beide Drähte des Drahtzuges durch ein gewichtbelastetes Hebelsystem gleichmäßig gespannt gehalten. Eine Klemmvorrichtung verhindert das Anheben des Spanngewichtes bei Betätigung des Stellhebels. Bei der oberen Lage des Stellhebels (Grundstellung) liegt die Weichenzunge ab; das Signal steht auf „Halt". Wird der Hebel nach unten gedreht (Abb. 2), so liegt die Weichenzunge an; das Signal steht auf „Fahrt". Eine mit einer Handfalle lösbare Sperrklinke hält den Stellhebel in beiden Endlagen fest. Mit dem Stellhebel steht ein Verschlußbalken mechanisch in Verbindung, der je nach Stellung des Stellhebels zwei unterschiedliche Höhenlagen einnimmt. Parallel zur Hebelbank sind Stangen verschiebbar angeordnet, die jeweils mit einem Fahrstraßenhebel mechanisch verbunden sind (Abb. 3). Diese Fahrstraßenschubstangen tragen auf ihrer Oberseite in Höhe des jeweiligen Verschlußbalkens ein Verschlußelement. Stehen (Abb. 4) die Signale 1a bis 3a auf „Halt" und ist keine andere Fahrstraße eingestellt, dann können die Weichen 1 und 4 und die Kreuzungsweichen 2 und 3 für die rot angezeigte Fahrstraße eingestellt werden. Befinden sich diese in der richtigen Lage, dann kann der zugehörige Fahrstraßenhebel betätigt werden. Hierzu muß zuvor vom Fahrdienstleiter die elektromagnetische Sperre durch Drücken einer Taste auf elektrischem Wege entriegelt werden. Beim Umlegen des Fahrstraßenhebels bewegt sich die Fahrstraßenschubstange. Die Verschlußelemente verschieben sich über oder unter die querliegenden Verschlußbalken, wodurch die Weichenstellhebel blockiert werden. Ist eine Weiche falsch gestellt, so läuft das Verschlußelement der Fahrstraßenschubstange gegen den in falscher Lage befindlichen Verschlußbalken an und gelangt nicht in Endlage. Das Signal 4a kann erst dann auf „Fahrt" gestellt werden, wenn die Fahrstraße richtig eingestellt und dadurch der Stellhebel des Signals mechanisch entriegelt ist.

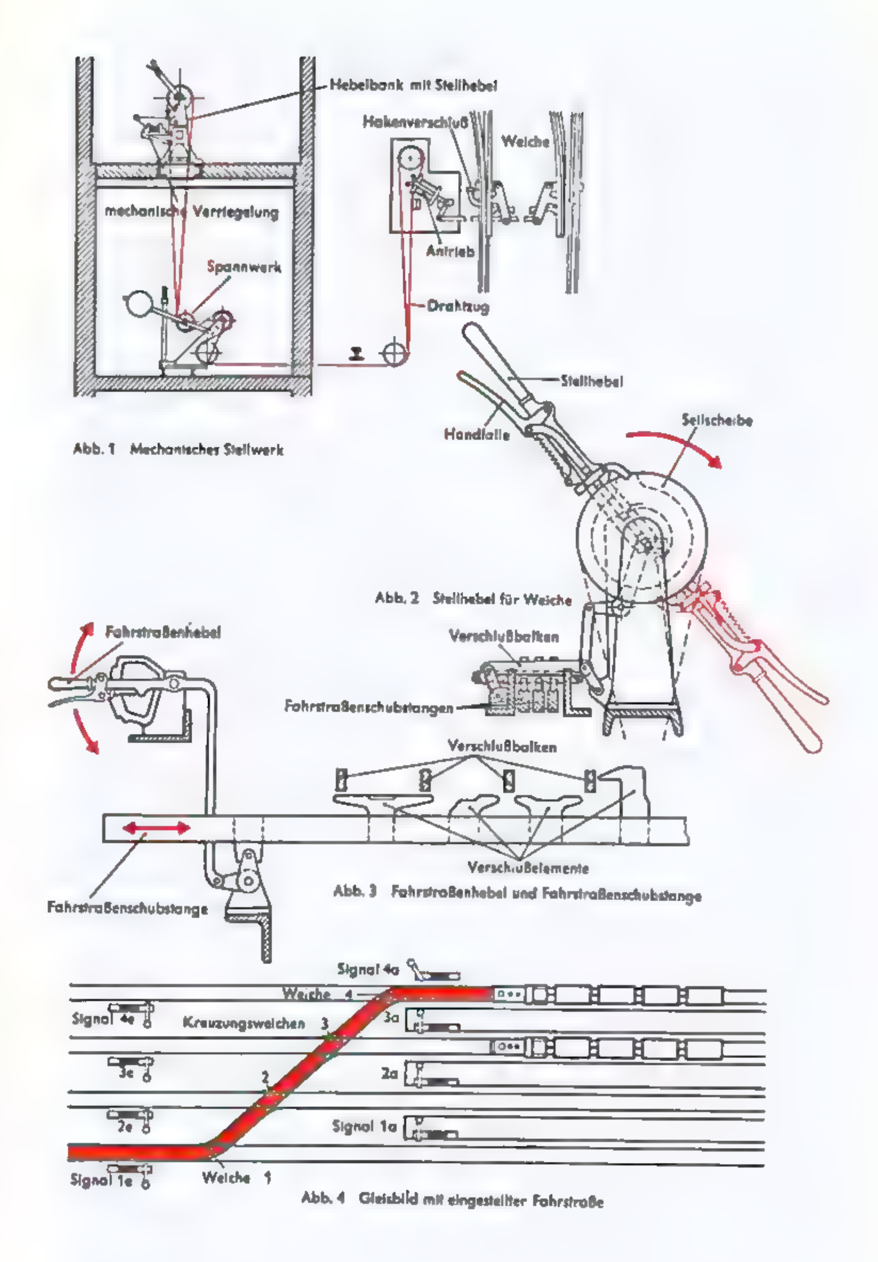


Abb. 1 Mechanisches Stellwerk

Abb. 2 Stellhebel für Weiche

Abb. 3 Fahrstraßenhebel und Fahrstraßenschubstange

Abb. 4 Gleisbild mit eingestellter Fahrstraße

STELLWERK II

Drucktasten- oder Gleisbildstellwerk: Das Drucktasten- oder Gleisbildstellwerk ist die z. Z. modernste Stellwerkbauform und ermöglicht eine weitgehende Rationalisierung und Automatisierung des Stellwerkdienstes. Der gesamte Stellwerkbereich ist in Form eines stark vereinfachten Gleisplans auf einem Bedienungspult (Stelltisch) wiedergegeben (Abb. 1). Die Weichen- und Kreuzungsneigung beträgt einheitlich 45°. Der Stelltisch ist aus rechteckigen genormten Bauelementen mit verschiedenen Deckplatten für Gleis, Weiche, Kreuzung, Signal usw. baukastenförmig zusammengesetzt. Im Gleisbild des Stelltisches sind Schlitze wie eine Kettenlinie entsprechend dem Gleisplan aneinandergereiht. Im Zentrum von Weichen und Kreuzungen befindet sich außerdem ein punktförmiger Kreisausschnitt. Die Schlitze und Kreisausschnitte können von unten verschiedenfarbig ausgeleuchtet werden. Hierdurch wird die Einstellung der Weichen, Kreuzungsweichen und Signale sowie die Gleisbelegung angezeigt.

Zum Betätigen der Weichen, zur Einstellung von Fahrstraßen und Signalen dienen kleine Drucktasten. Die Drucktasten befinden sich auf dem Stelltisch unmittelbar neben den zugehörigen Weichen und Kreuzungsweichen (Abb. 1). Jedem Signal ist im eingezeichneten Gleis eine Drucktaste zugeordnet. Ferner sind im Gleisplan des Stelltisches an verschiedenen Stellen Start- und Zieltasten vorgesehen. Zum Auslösen des Stellvorganges ist aus Sicherheitsgründen das gleichzeitige Drücken zweier Tasten erforderlich. Hierdurch wird verhindert, daß bei unbeabsichtigter Berührung eines Druckschalters ein Stellvorgang eingeleitet wird. Zum Stellen einzelner Weichen, Kreuzungen und Signale sind außerhalb des Gleisplanes auf einer Seite des Pultes als zweiter Schalter Gruppenweichen und Gruppensignaltasten angeordnet. Wird z. B. nur eine einzelne Weiche gestellt, so muß die entsprechende Weichendrucktaste und gleichzeitig die zugehörige Gruppenweichentaste betätigt werden. Die Stellung der Weiche wird durch gelbes Ausleuchten des im Gleisbild der Weiche vorhandenen Kreisausschnittes und des darauffolgenden ersten Schlitzes angezeigt (Abb. 2). Für das Einstellen einer Fahrstraße ist es nicht erforderlich, die in diesem Streckenabschnitt gelegenen Weichen etc. einzeln einzustellen. Es muß lediglich eine Start- und Zieltaste, die jeweils im Gleisplan an entsprechender Stelle angeordnet ist, gedrückt werden. Selbsttätig werden dann die Gleise auf Freisein geprüft, die Weichen und Kreuzungsweichen dieses Streckenabschnittes in die richtige Lage gebracht, die Fahrstraße verschlossen und festgelegt sowie die Signale auf „Fahrt" gestellt. Die gewählte Fahrstraße leuchtet gelb auf. Fährt der Zug in diese Fahrstraße ein, so wechselt mit dessen Bewegung die gelbe Farbe in den Leuchtschlitzen auf rot. Hinter dem Zug geht das rote auf gelbes Blinklicht über, um kurz darauf zu verlöschen. Die Signale zeigen wieder „Halt". Die Fahrstraße ist aufgelöst, entsichert.

Im Stelltisch sind nur Meldelampen und Bedienungstasten angeordnet. Das Gehirn des Stellwerkes ist die Relaisanlage, wo die vom Stelltisch kommenden Stellbefehle in Form von niedergespannten elektrischen Signalen entsprechende Relais ansteuern (Abb. 3). Die in Gestellen zusammengefaßten Relaissätze befinden sich in vom Stelltisch getrennt liegenden Räumen (Abb. 4). Die entsprechende elektrische Schaltung aller Relais stellt sämtliche Abhängigkeiten zwischen Weiche, Fahrstraßen und Signalen her und ermöglicht deren Blockung. Ferner bewirken die Relais die entsprechende Ausleuchtung am Stelltisch.

Die Relais schalten die für den Stellantrieb von Weichen und Kreuzungsweichen erforderliche Spannung von 130 V. Die Weichenlage überwacht ein 30-V-Stromkreis, wozu im Weichenantrieb entsprechende Kontakte eingebaut sind. Die Gleisfrei- und Gleisbesetztmeldungen geschehen selbsttätig.

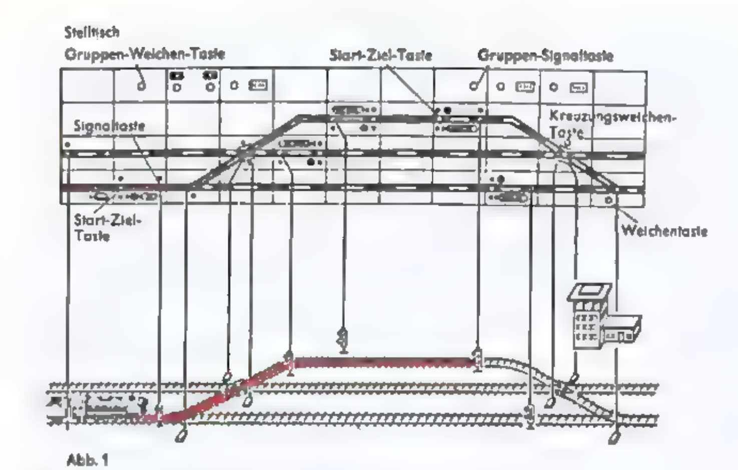


Abb. 1

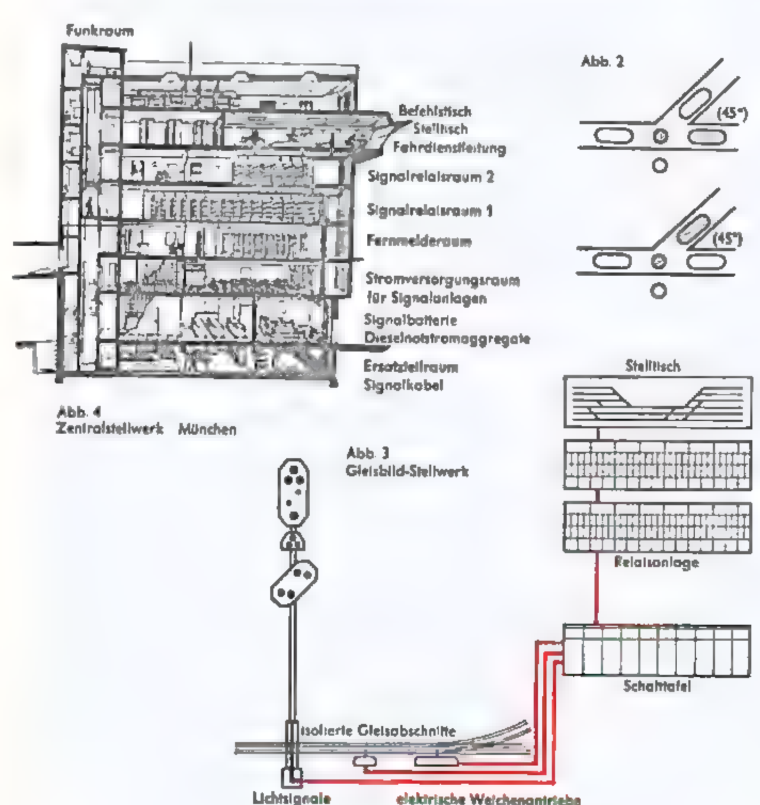


Abb. 4
Zentralstellwerk München

Abb. 2

Abb. 3
Gleisbild-Stellwerk

STRASSENBAHN

Die Straßenbahn ist eine elektrisch betriebene Schienenbahn zur Personenbeförderung im städtischen Nahverkehr. Die Gleise sind in den Straßenzügen der Innenstadt verlegt, wobei die Rillenschienen stufenlos mit der Straßenoberfläche abschließen. Die Spurweite der Straßenbahnschienen beträgt 1000 mm Meterspur oder 1435 mm Regelspur. Die Straßenbahn wird wie ein Kraftfahrzeug auf Sicht gefahren. Moderne Straßenbahnfahrzeuge sind mehrgliedrige, mit Durchgängen gelenkig miteinander verbundene Drehgestell-Triebwagen. Der Seitenausschlag und Platzbedarf eines 12-achsigen 4-Gelenkwagens ist bei Kurvenfahrt nicht größer als der eines alten 2-achsigen Triebwagens mit Beiwagen.
Der selbsttragende Kastenaufbau der Zwischenglieder stützt sich brückenartig auf den jeweils an den Enden angeordneten zweiachsigen Zwischendrehgestellen ab. Das Zwischendrehgestell ist über einen zweifachen Drehkranz jeweils mit einem der gegenüberliegenden Enden des Zwischenglied-Wagenkastens verbunden. Durch diese Anordnung können Drehgestell und beide Wagenkasten unabhängige Schwenkbewegungen ausführen. Der erste und letzte Wagenkasten des 4-Gelenkzuges weist zusätzlich ein zweiachsiges Drehgestell auf. Dieses ist über einen einfachen Drehkranz schwenkbar mit dem Wagenkasten verbunden. Beide Drehgestelle haben zwischen den Treibachsen einen 100-kW-Gleichstrom-Reihenschlußmotor in Längsrichtung angeordnet (Abb. 1). Beide Wellenenden arbeiten jeweils über einen Winkeltrieb auf eine Treibachse. Beiderseits des Tellerrades stellt eine elastische, ringförmige Gummikupplung die kraftschlüssige Verbindung zwischen Winkelgetriebe und Treibachse her. Treib- und Laufachsen sind über Achslager und wartungsfreie Metallgummi-Tragfedern mit dem Drehgestellrahmen verbunden. Die kleinen Räder, die einen Laufkreisdurchmesser von 630 bis 830 mm aufweisen, haben zwischen Radkörper und Radscheibe (Abb. 2) eine in Segmente unterteilte Gummiringfeder. Der Drehgestellrahmen stützt sich über Tonnenfedern am Drehkranz ab, wobei Stoßdämpfer Schwingungen unterbinden.
Der Gleichstrom von meistens 600 V oder 750 V wird einer Fahrleitung entnommen. Die Leistungsregelung der Fahrmotoren erfolgt durch Veränderung der Motorspannung. Beim Anfahren sind sämtliche Widerstände und beide Motoren in Reihe geschaltet (Abb. 3 a). Läuft der Rotor des Motors an, so wird eine Gegenspannung induziert (elektromotorische Gegenkraft), die mit steigender Rotordrehzahl zunimmt. Diese Gegenspannung setzt die Stromzufuhr des Motors herab. Um die beim Anfahren erforderliche Stromstärke beizubehalten, müssen die Vorschaltwiderstände entsprechend stufenweise abgeschaltet werden. Sind alle Widerstände herausgenommen, so liegt an den in Reihe geschalteten Motoren die halbe Fahrdrahtspannung an (Abb. 3 a). Durch Parallelschalten der Motoren und mit den stufenweise abschaltbaren Vorwiderständen (Abb. 3 b) ergeben sich weitere Fahrstufen. Die volle Fahrdrahtspannung liegt an den Motoren an, wenn alle Widerstände abgeschaltet sind. Schaltet man weiterhin einen Widerstand parallel zur Feldwicklung, so wird der durch den Anker fließende Strom zwischen Feldwicklung und Widerstand aufgeteilt und die Magnetwirkung geschwächt (Abb. 3 c). Da die Drehzahl n umgekehrt proportional dem magnetischen Kraftfluß Φ ist ($n \sim \frac{1}{\Phi}$), läuft der Motor schneller. Durch Verändern des Parallelwiderstandes (Shunt) ergeben sich weitere Fahrstufen.
Die Hauptbremse der Straßenbahn ist die elektrische Widerstandsbremse (Kurzschlußbremse). In den als Generator geschalteten Motoren wird mit der kinetischen Energie des Fahrzeuges elektrischer Strom erzeugt, der in Widerständen in Wärmeenergie umgewandelt wird (Abb. 3 d). Der erzeugte Strom sinkt mit abnehmender Fahrzeuggeschwindigkeit. Damit ein ausreichender Bremsstrom erhalten bleibt, müssen die Vorwiderstände entsprechend der abnehmenden Fahrzeuggeschwindigkeit stufenweise abgeschaltet werden. Zuletzt ist der Generator kurzgeschlossen.

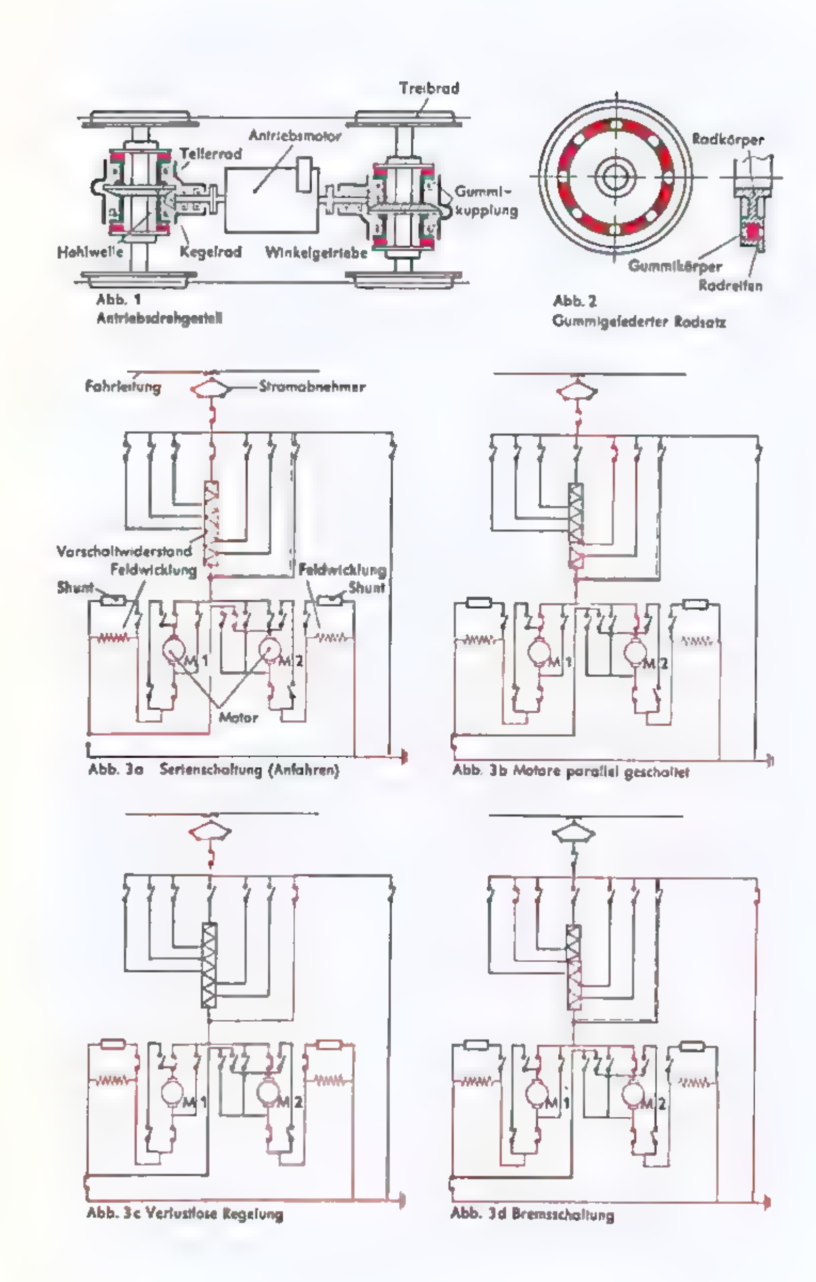


Abb. 1 Antriebsdrehgestell

Abb. 2 Gummigefederter Radsatz

Abb. 3a Serienschaltung (Anfahren)

Abb. 3b Motore parallel geschaltet

Abb. 3c Verlustlose Regelung

Abb. 3d Bremsschaltung

U-BAHN

Die Untergrundbahn (U-Bahn) ist eine elektrisch betriebene Schienenbahn zur Personenbeförderung im städtischen Nahverkehr, deren Gleiskörper vorwiegend unterirdisch in Tunnels verläuft. Infolge der unterirdischen Linienführung kann die U-Bahn weitgehend unabhängig von dem Verlauf der Straßen einer Stadt angelegt werden. Der U-Bahn kommt immer größere Bedeutung zu, da sie einen wesentlichen Beitrag zur Entlastung des innerstädtischen Straßenverkehrs leistet. Dichte Zugfolge, großes Platzangebot, hohe Endgeschwindigkeit trotz der Halteabstände von etwa 500 m ermöglichen wie bei der S-Bahn eine große Transportleistung. Haltestellen beider Bahnen sind häufig unmittelbar benachbart angeordnet (Abb. 1), wodurch den Fahrgästen ein schneller, zeitsparender Wechsel vom Vorortzubringer zum innerstädtischen Nahverkehrsmittel möglich ist.

Der Bau neuer U-Bahntunnel im Stadtkern ist eine bau- und verkehrstechnisch schwierige Aufgabe. Der Weg der U-Bahn, die Trasse, kann wegen der hohen Geschwindigkeit der Züge nicht den winkligen Straßenzügen der Innenstadt folgen. Es müssen Gebäude, Straßen, Verkehrsknoten etc. unterfahren werden. Die offene Bauweise mit den platzraubenden, verkehrsstörenden tiefen Baugruben ist daher vielfach nicht möglich. In diesen Fällen müssen die Tunnelröhren unterirdisch vorgetrieben werden. Die genaue Kenntnis des Baugrundes und des Grundwasserspiegels ist unerläßlich. Ein weitgehend mechanisierter Tunnelvortrieb ist mit dem Schildvortrieb (Abb. 2) möglich. Am Kopf des Schildes ist eine mit Messerbalken oder Schürfplatten versehene Scheibe angeordnet. Diese führt, durch einen entsprechenden Antrieb bewegt, pendelnde oder drehende Bewegungen aus und schabt so den vor Ort anstehenden Boden ab. Hydraulische Vortriebspressen drücken den Schildmantel in den Grund. Das ausgebrochene Material wird von einem Förderband aufgenommen und über eine Druckluftschleuse in einen Transportwagen gekippt. Dieser karrt den Baugrund zu einem Schacht, wo das Material von dem Greifer eines Kranes erfaßt und an die Erdoberfläche geschafft wird. Die Tunnelauskleidung erfolgt z. B. mit eisernen, segmentförmigen Tunnelbausteinen, den Tübbings (Abb. 3). Die Tübbings werden innerhalb des Schildes zu Ringen zusammengesetzt und durch Schrauben verspannt. Die einzelnen Ringe werden gliederförmig aneinandergesetzt und ebenfalls verschraubt. Die Tunnelröhren liegen z. T. so tief im Baugrund, daß infolge des hohen Standes des Grundwassers erheblicher Flüssigkeitsdruck auf ihnen lastet. Um einen Wassereinbruch während des Vortriebes zu verhindern, steht der Arbeitsraum unter erhöhtem Luftdruck, der dem Druck des Wassers angepaßt wird. Eine Druckschleuse dichtet den Bauabschnitt von der bereits fertiggestellten Tunnelröhre ab (Abb. 2). Ist der Vortrieb vollendet, so werden die Stahlbetonausbauten für das Gleisbett, die Bahnsteige und Gehsteige ausgeführt, der Gleisoberbau hergestellt, die Belüftungsvorrichtungen sowie die elektrischen Einrichtungen installiert (Abb. 4).

Die Spurweite des Gleiskörpers beträgt wie bei der S-Bahn vorwiegend 1435 mm Vollspur. Dichte Zugfolge und hohe Reisegeschwindigkeit machen besondere Zugsicherungsmaßnahmen notwendig (s. S-Bahn).

U-Bahnzüge bestehen aus zusammengekoppelten Triebwagen mit Einzelachsantrieb. Der enge Halteabstand und die geforderte hohe Reisegeschwindigkeit machen eine große Anfahrbeschleunigung, bis 1,3 m/s², der Triebwagen erforderlich. Die U-Bahn-Triebwagen gleichen im wesentlichen den Triebzügen der S-Bahn.

Die Motoren des Einzelachsantriebes sind in den Drehgestellen untergebracht und werden mit ca. 700 V Gleichspannung gespeist. Die Stromzuführung erfolgt mit einer seitlich neben dem Gleis angeordneten dritten Schiene als Stromschiene, die im Gegensatz zur S-Bahn durch Stromabnehmer von unten bestrichen wird (Abb. 5).

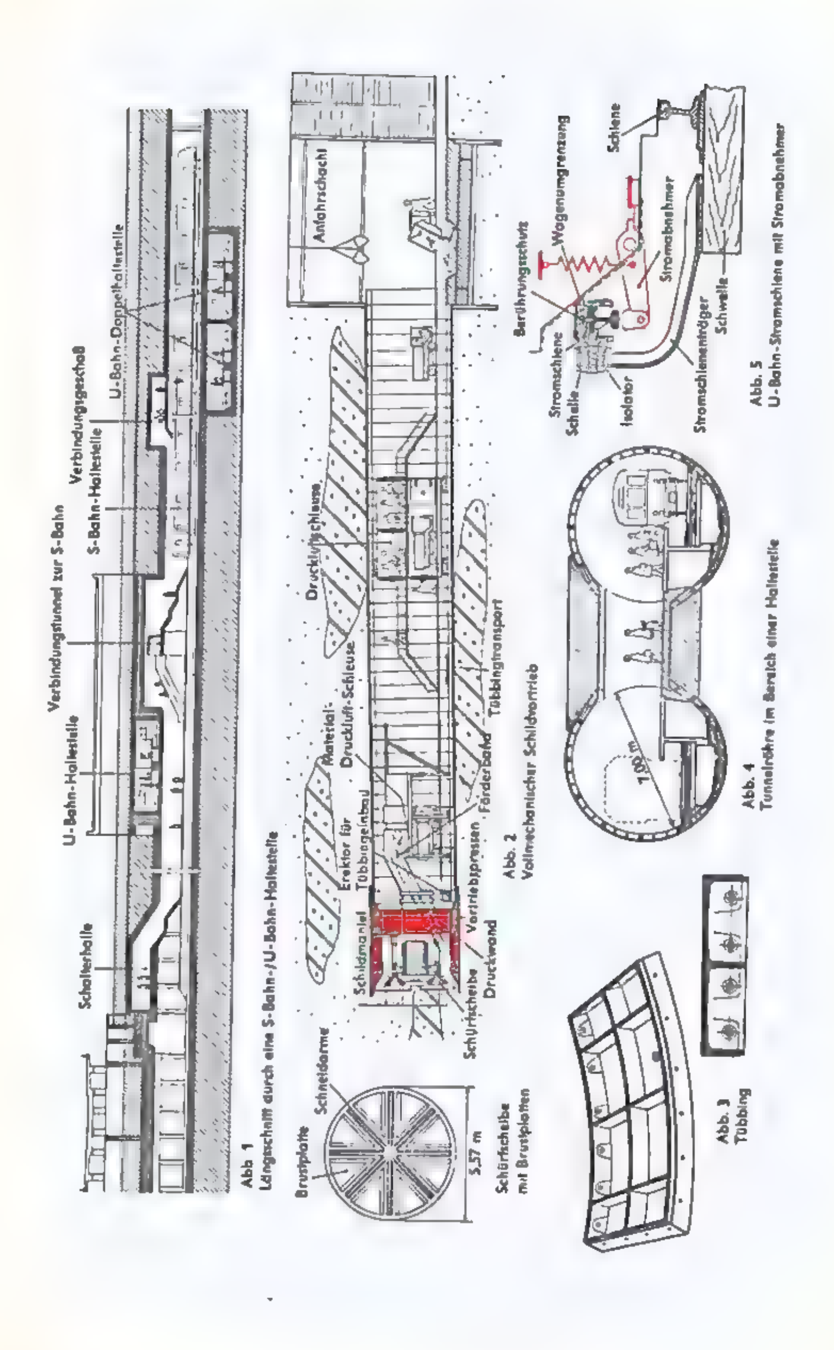


Abb. 1 Längsschnitt durch eine S-Bahn-/U-Bahn-Haltestelle

Abb. 2 Vollmechanischer Schildvortrieb

Abb. 3 Tübbing

Abb. 4 Tunnelröhre im Bereich einer Haltestelle

Abb. 5 U-Bahn-Stromschiene mit Stromabnehmer

S-BAHN

Die Stadt-Schnellbahn (Abb. 1) ist eine elektrisch betriebene Schienenbahn zur Beförderung von Personen im Stadt- und Vorortverkehr. Dichte Zugfolge, großes Raumangebot der Fahrzeuge und hohe Geschwindigkeit trotz kurzer Halteabstände ermöglichen große Transportleistung. Die S-Bahn ergänzt Straßen- und U-Bahn großer städtischer Ansiedlungen. Die Streckenführung verläuft oberirdisch meist auf Dämmen. Häufig steht das Streckennetz mit dem Fernbahnnetz in Zusammenhang. Mit geringen Ausnahmen beträgt die Spurweite, der Mittenabstand der beiden Schienenköpfe eines Gleises, wie bei den Fernbahnen 1435 mm Vollspur.

Die dichte Zugfolge macht besondere Sicherungsanlagen notwendig. Hierzu ist die Strecke engmaschig in Blockabschnitte unterteilt. Die den Streckenblock sichernden Signale werden selbsttätig durch die Züge gesteuert. Die Länge des Blockabschnittes ist durch die Dichte der aufeinanderfolgenden Züge einerseits und deren Bremsweg andererseits bestimmt. Die Überwachung der Blockabschnitte, die Gleisfreimeldung, erfolgt automatisch (s. Stellwerk 2). Die Einhaltung der von den Signalen gegebenen Fahrbefehle wird von der automatischen Zugbeeinflussung (Indusi) kontrolliert (s. Sicherheitsvorrichtungen der Eisenbahn) und wenn erforderlich wird eine Bremsung automatisch eingeleitet.

S-Bahnzüge müssen wegen des kurzen Halteabstandes und wegen der geforderten hohen Endgeschwindigkeit von über 80 km/h eine große Anfahrbeschleunigung, bis zu 1 m/s², aufweisen und sind daher Triebzüge mit Einzelachsantrieb. Ein Triebzug besteht aus mehreren zusammengekoppelten Fahrzeugen. An beiden Enden befindet sich jeweils ein mit einem Führerstand ausgerüsteter Steuerwagen. Moderne Triebwagen sind wegen des ruhigen Laufes Drehgestellfahrzeuge. Rahmen und Fahrzeugaufbau werden in Leichtbauweise hergestellt, wobei der Wagenkasten mittragend ausgeführt ist. Zur Beschleunigung des Fahrgastflusses beim Ein- und Aussteigen verfügen die Triebwagen über mehrere, großen Durchlaß freigebende Türen. Die Türen werden mit Druckluft betätigt und können vom Führerstand aus durch den Fahrzeugführer zentral geschlossen werden. Das Öffnen der während der Fahrt gesicherten Türen durch Betätigen des Handgriffes geschieht selbsttätig. Die Fußbodenhöhe der Triebwagen befindet sich nahezu auf gleicher Ebene mit dem Bahnsteig der Haltestellen, wodurch den Fahrgastwechsel verlangsamende Treppen entfallen.

Zur bestmöglichen Ausnutzung der Verkehrsflächen befinden sich alle zum Antrieb, Steuern und Bremsen des Triebwagens erforderlichen Einrichtungen unterhalb des Wagenbodens. Die Treibräder haben Einzelachsantrieb (Abb. 2). Der Motor ist wippenförmig einerseits im Drehgestell, andererseits auf der Treibachse gelagert. Ein einstufiges Zahnradgetriebe verbindet Motor und Treibachse kraftschlüssig. Die Reihenschluß-Kommutatormotoren (s. Elektrolokomotive) haben eine Leistung von 1200—1600 kW. Sie werden häufig mit Gleichstrom von 600 bis 1200 V betrieben. Die Stromzuführung erfolgt durch eine dritte Schiene. Diese Stromschiene (Abb. 3) verläuft seitlich neben dem Gleis und ist über Isolatoren und Stromschienenträger an den Schwellen befestigt. Die Stromschienen werden z. B. seitlich von Stromabnehmern bestrichen. Jede Gleiskreuzung bedingt eine Unterbrechung der Stromschiene. Daher ist jede Zugeinheit mit mehreren Stromabnehmern ausgerüstet, die seitlich an den Drehgestellen angebracht sind.

Die Regelung von Geschwindigkeit und Zugkraft erfolgt bei Gleichstrommotoren durch Anfahrwiderstände, Motorgruppenschaltung und Feldschwächung. Triebzüge, die auch auf dem Fernbahnnetz verkehren, sind für Einphasenwechselstrom von 15 000 V, 16²/₃ Hertz, gebaut und entnehmen den Strom einer Fahrleitung. Die Regelung der Fahrmotoren erfolgt über die Motorspannung. S-Bahn-Triebzüge sind mit einer elektrischen Widerstandsbremse (s. Elektrolokomotive) und mit einer Druckluftbremse (s. Eisenbahnbremse 1 und 2) ausgerüstet.

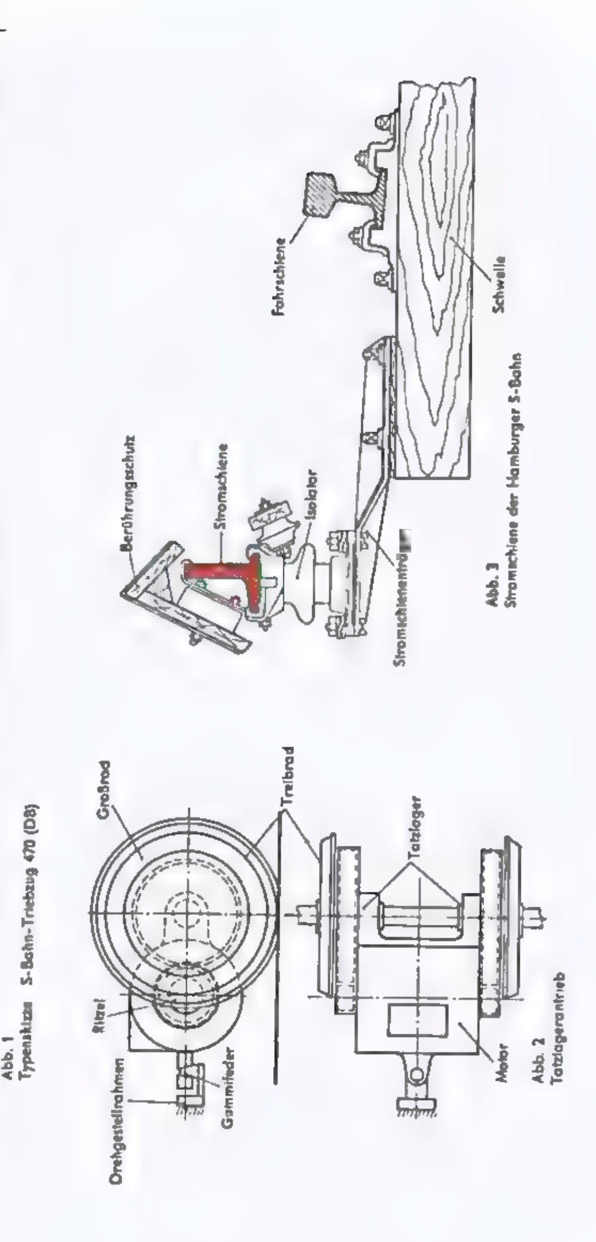


Abb. 1 Typenskizze S-Bahn-Triebzug 470 (DB)

Abb. 2 Tatzlagerantrieb

Abb. 3 Stromschiene der Hamburger S-Bahn

SEILBAHNEN

Der gebräuchlichste Bergbahntyp ist die Seilbahn (Abb. 1). Sie fährt auf einem Tragseil, das in der Bergstation verankert ist und in der Talstation durch ein Gewicht gespannt wird. Zwei Tragseile laufen parallel von der Berg- zur Talstation, so daß beim Zweigondelbetrieb jede Gondel ein Tragseil besitzt. Dieses Zweiseilsystem ist allgemein üblich; in flacherem Gelände werden auch mehr als zwei Gondeln eingesetzt, die dann hintereinander auf einem endlosen, umlaufenden Seil angebracht sind. Masten stützen die beiden Tragseile ab. Sie müssen so hoch sein, daß die Kabine nicht (z. B. durch vorspringende Felsen) gefährdet wird. Die Kabinen (Abb. 2 u. 3) hängen an einer Laufkatze; sie sind beweglich gelagert, so daß sie immer senkrecht hängen, unabhängig von der Neigung der Tragseile. Die Laufkatze besteht aus einer Anzahl Seilrollen, die gelenkig miteinander verbunden sind. Dadurch wird ein weicheres Passieren der Stützen erreicht (Abb. 3). Beim Zweigondelbetrieb sind die Laufkatzen der beiden Gondeln mit einem Zugseil fest verbunden. Das Zugseil wird von einer Seilrolle in der Talstation angetrieben und in der Bergstation durch Seilrollen umgelenkt. Die Seilrolle ist mit ihrem gesamten Antrieb, der durch einen Elektromotor über ein Getriebe erfolgt, beweglich gelagert, und spannt das Zugseil über das Gegengewicht. Ähnlich wie bei der Bergbahn mit Seilzugbetrieb sind die beiden Gondeln an das umlaufende Zugseil gekoppelt; wird das Zugseil in Bewegung gesetzt, fahren die Gondeln in der Berg- bzw. Talstation gleichzeitig ab.

Die Seilbahn besitzt eine Sicherheitseinrichtung (Fangbremse), die beim Reißen des Zugseiles automatisch betätigt wird (Abb. 4). Dabei wird die Laufkatze am Tragseil durch eine Vorrichtung festgeklammert, so daß die Gondel unbeweglich stehen bleibt. Die Fahrgäste der Gondel können dann ohne Gefahr abgeseilt werden. Seilbahnen mit großer Geländehöhe besitzen außerdem ein Hilfsseil; wenn das Zugseil reißt, klemmt sich das Laufwerk der Gondel an dem Hilfsseil selbsttätig fest, und die Gondel kann in die Station eingeholt werden.

Sesselbahnen sind Einzelumlaufbahnen, bei denen die Sessel am Tragseil festgeklammert sind. Das Tragseil dient gleichzeitig als endloses Förderseil, die Sessel werden in der Station bei Fahrt bestiegen oder verlassen. *Schischlepplifte* sind wie die Sesselbahnen konstruiert, nur befinden sich an Stelle der Sessel an gekröpften Bügeln Schleppseile.

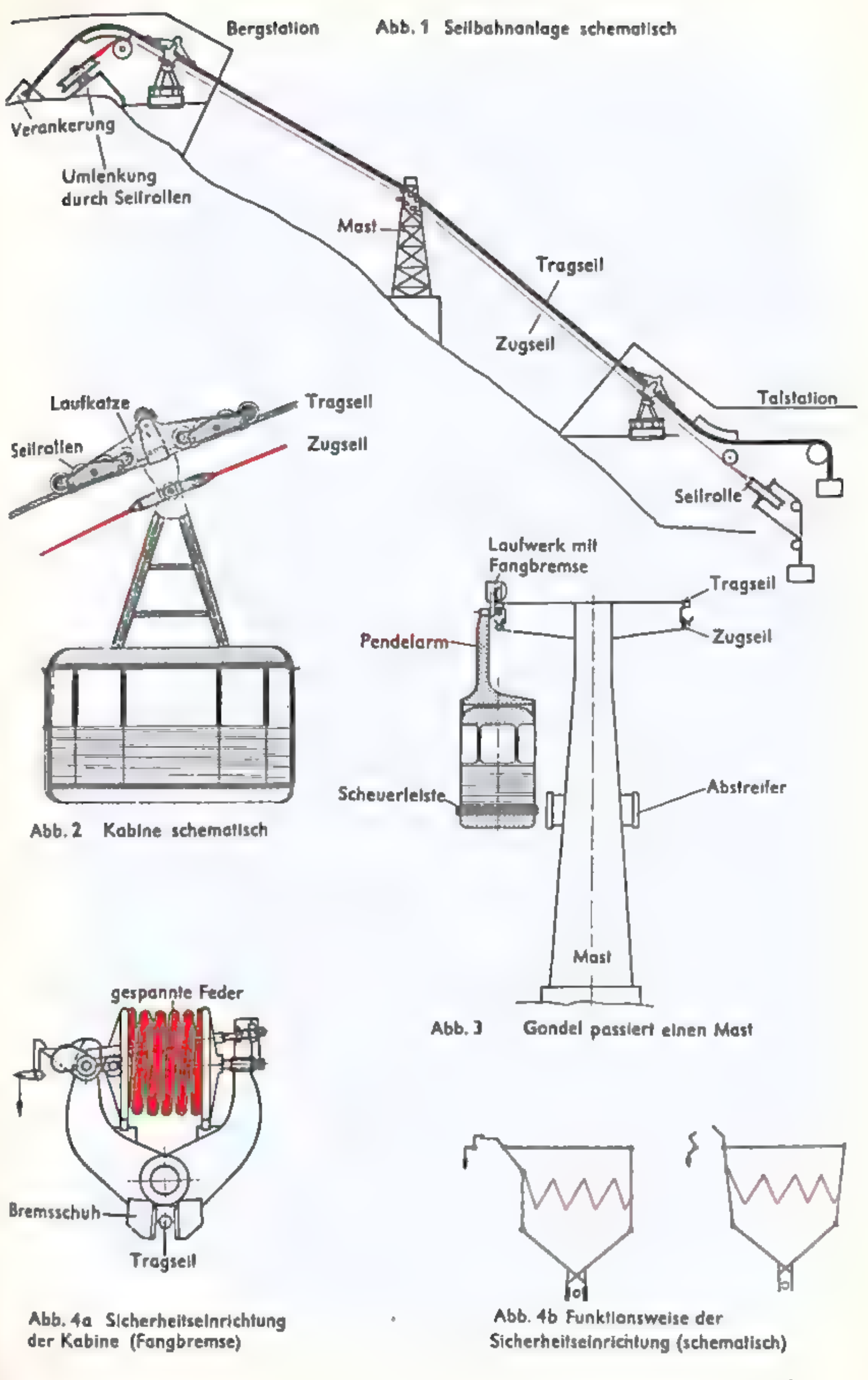


Abb. 1 Seilbahnanlage schematisch

Abb. 2 Kabine schematisch

Abb. 3 Gondel passiert einen Mast

Abb. 4a Sicherheitseinrichtung der Kabine (Fangbremse)

Abb. 4b Funktionsweise der Sicherheitseinrichtung (schematisch)

DOCK

Schiffe müssen gelegentlich aus dem Wasser gehoben werden, damit das Unterschiff besichtigt, gereinigt und kontrolliert werden und notwendige Reparaturarbeiten oder die Erneuerung des Anstriches durchgeführt werden können. Hierzu werden Docks verwendet; ihre Größe richtet sich nach den Abmessungen und dem Gewicht der zu bauenden oder zu reparierenden Schiffe. Schwimmdocks werden in sehr unterschiedlicher Größe, von einigen 100 t bis zu 50000 t Hebefähigkeit gebaut, wobei die größeren durch entsprechendes Zusammensetzen von Kopf- und Zwischensektionen weitgehend dem jeweils zu dockenden Schiff angepaßt werden können. Schwimmdocks sind in gewissem Umfange ortsveränderlich, teils mit Schlepperhilfe, teils mit Eigenantrieb. Ihre Hebeleistung ist nur dem jeweils zu dockenden Schiff entsprechend notwendig. Trockendocks werden der hohen Baukosten wegen meist nur für extrem große Schiffe gebaut. Von besonderer Bedeutung ist der Einfluß des Grundwasserdrucks auf den Dockboden bei leerem Dock. In kritischen Fällen werden unter dem Dockboden Sammelbrunnen errichtet, aus denen das anfallende Grundwasser zur Entlastung des Bodens laufend abgepumpt wird.

Parallel zu der Docklängsachse laufen fahrbare Dockkrane, die mit ihren Auslegern mindestens bis Dockmitte, meist aber noch darüber hinausreichen, um Bau- und Maschinenteile aus- und einbringen zu können. Bei Trockendocks, die als Baudocks verwendet werden, haben die Krane große Tragfähigkeit (bis etwa 200 t).

Schwimmdocks (Abb. 1a) haben meist U-förmigen Querschnitt. Ihr Boden und auch ein Teil der Seiten bilden Zellen, die geflutet oder mit Hilfe von Lenzpumpen geleert werden können. In Dockmitte sind Kielpallen zur Aufnahme des Schiffes angeordnet. Seitliche, entsprechend der Breite des einzudockenden Schiffes, verstellbare Kimmpallen sichern das Schiff gegen Kippen. Ein Schwimmdock besteht aus den beiden Kopfsektionen und einer veränderlichen Zahl von Zwischensektionen, entsprechend der Größe des zu dockenden Schiffes (Abb. 1b). Zum Eindocken eines Schiffes werden die Boden- und Seitenzellen durch Öffnen der Flutventile (Abb. 1c) und das Dock soweit abgesenkt, daß das Schiff in das Dock einfahren kann (Abb. 1d). Anschließend werden die Zellen leergepumpt (Abb. 1e) und somit schwimmen Dock und Schiff gemeinsam soweit auf, daß sich der Dockboden über der Wasseroberfläche befindet (Abb. 1f). Das Schiff liegt dabei auf den Kiel- und Kimmpallen. Nach Durchführung der Dockarbeiten werden die Zellen wieder geflutet (Abb. 1c); das Dock senkt sich zunächst soweit ab, bis das Schiff schwimmt. Dann wird das Dock allein noch weiter abgesenkt, damit das Schiff ungehindert ausfahren kann (Abb. 1d).

Trockendocks gleichen einer langgezogenen Wanne, deren Boden tiefer liegt als der Tiefgang der größten zu dockenden oder zu bauenden Schiffe, und deren fahrwasserseitig gelegene Schmalseite durch ein einschwimmbares Docktor gegenüber dem Fahrwasser abgeschlossen ist (Abb. 2a). Kiel- und verstellbare Kimmpallen sind auf der Docksohle vorgesehen. Zum Docken wird das Dockbecken geflutet (Abb. 2c), bis Wasserstandsausgleich zwischen Dock und Fahrwasser erreicht ist. Anschließend wird das Docktor ausgefahren; das Schiff kann nun einlaufen, wobei unter Umständen bei sehr großen Schiffen der Gezeitenhub berücksichtigt werden muß (Abb. 2b). Nach dem Einfahren des Docktores wird das Schiff durch Leerpumpen des Dockbeckens auf die Pallen abgesetzt (Abb. 2d). Im Anschluß an die Dockarbeiten wird das Dock wieder geflutet bis zum Wasserstandsausgleich, das Docktor ausgefahren und das Schiff ins freie Fahrwasser bugsiert.

Dockschiffe sind fahrbare Trockendocks. Sie können auf See Schiffe an Bord nehmen und in ihrem Dockbecken auf Pallen absetzen. Dockschiffe werden im allgemeinen für kleine und mittlere Schiffe verwendet, die wegen einer Störung oder Beschädigung eine ortsgebundene Dockanlage nicht mehr anlaufen können und deshalb auf See eindocken müssen (Abb. 3a und 3b).

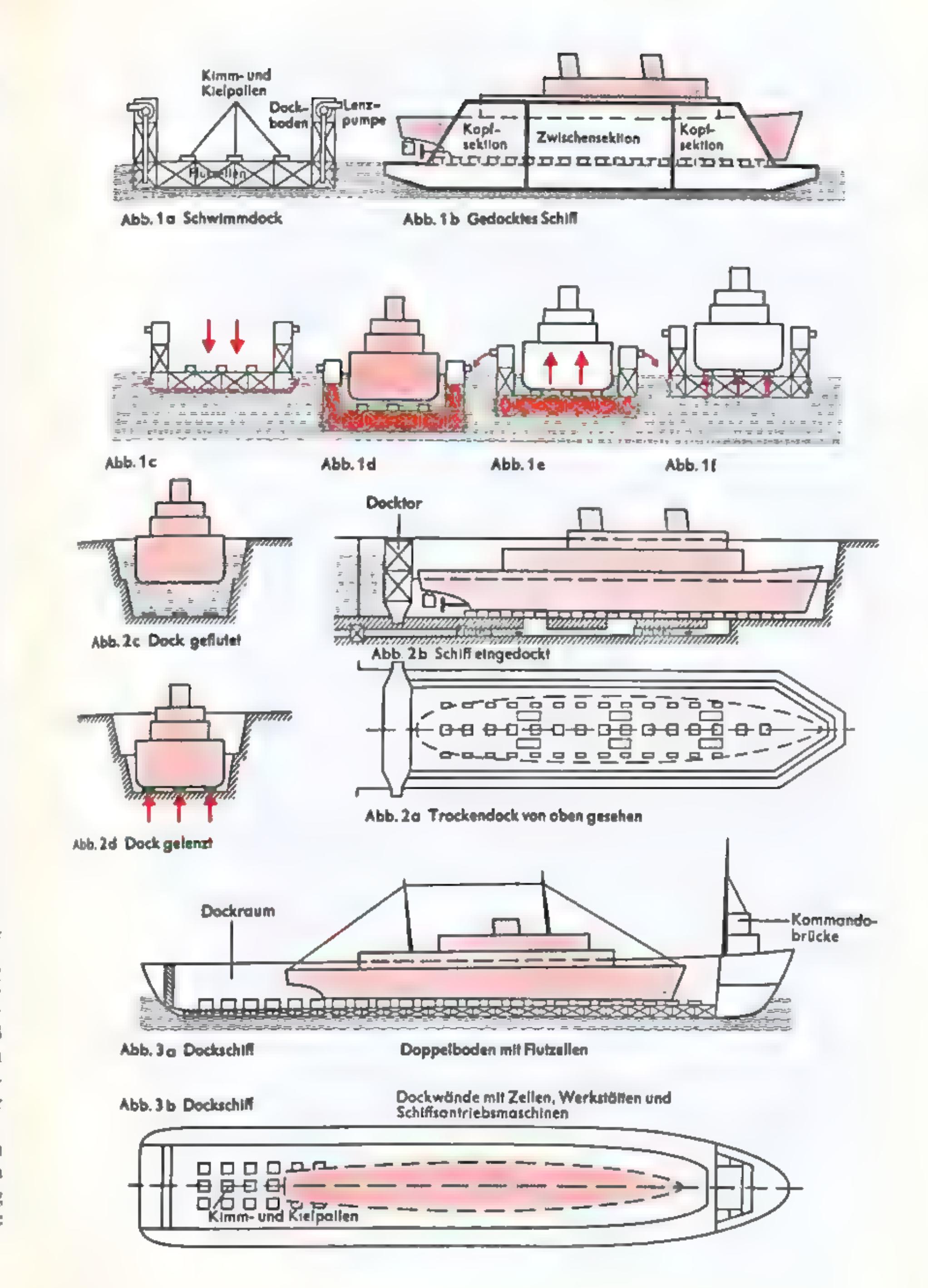


Abb. 1a Schwimmdock
Abb. 1b Gedocktes Schiff
Abb. 1c
Abb. 1d
Abb. 1e
Abb. 1f
Abb. 2c Dock geflutet
Abb. 2b Schiff eingedockt
Abb. 2a Trockendock von oben gesehen
Abb. 2d Dock gelenzt
Abb. 3a Dockschiff
Abb. 3b Dockschiff

WARUM EIN SCHIFF SCHWIMMT

Grundlage der Schwimmfähigkeit eines Schiffes ist das Archimedische Prinzip. Nach diesem Prinzip wird jeder Körper, der in eine Flüssigkeit getaucht wird, um so viel leichter, wie die von ihm verdrängte Flüssigkeitsmenge wiegt. So wird man feststellen, daß ein massiver Würfel aus Aluminium, sofern er gerade einen Liter Rauminhalt hat, 2,7 kp wiegt (Abb. 1 a); taucht man ihn aber nach Abbildung 1 b in Wasser, so wiegt er nur noch 1,7 kp. Der Aluminiumwürfel ist, da er 1 Liter Volumen hat und infolgedessen 1 Liter bzw. 1 kp Wasser verdrängt, um das Gewicht der von ihm verdrängten Wassermenge leichter geworden. Auf ihn wirkt also eine in ihrer Richtung der Schwerkraft entgegengesetzte (gewichtsmindernde) Kraft, die Auftriebskraft. Diese senkrecht nach oben wirkende Auftriebskraft greift am Formschwerpunkt des Volumens an, das von dem in die Flüssigkeit eintauchenden Körper eingenommen wird (gleich Volumen der verdrängten Flüssigkeitsmenge). Kann ein Körper bei restlosem Untertauchen mehr Flüssigkeitsgewicht verdrängen, als er selbst wiegt, so wird er nur so tief in die Flüssigkeit eintauchen, bis der entstehende Auftrieb gleich seinem Gewicht ist. Ein Würfel aus Holz, der bei einem Liter Rauminhalt etwa 0,8 kp wiegt, taucht so weit ins Wasser ein, bis er 0,8 Liter, d. h. 0,8 kp Wasser verdrängt hat (Abb. 2). Die restlichen 0,2 Liter Holz tauchen nicht ein, weil schon vorher Gleichgewicht zwischen dem Eigengewicht und dem Auftrieb besteht; man sagt in diesem Fall: der Körper schwimmt. Nun besitzt Holz eine geringere durchschnittliche Dichte als Wasser (die Dichte ϱ ist gleich der Masse m geteilt durch das Volumen V eines Körpers) und schwimmt; Metall und andere Stoffe dagegen haben eine größere durchschnittliche Dichte und gehen unter. Damit ein eisernes Schiff schwimmt, muß sein Inneres sehr viel Luftraum (s. Abb. 3) enthalten, so daß seine durchschnittliche Dichte geringer wird als die des Wassers.

Ein Schiff muß jedoch zusätzlich zur Schwimmfähigkeit noch die Eigenschaft besitzen, sich aus einer geneigten Lage wieder aufrichten zu können. Bei symmetrischer Gewichtsverteilung liegen der Gewichtsschwerpunkt G und der Formschwerpunkt F des Antriebs lotrecht übereinander auf der Mittschiffslinie. Bei unsymmetrischer Gewichtsverteilung oder durch Einwirken äußerer Kräfte querschiffs wie Winddruck oder Trossenzug, oder längsschiffs entstehen Krängung (Abb. 4 a) bzw. Trimmung (Abb. 4 b) des Schiffes. Soll ein Schiff nicht kentern, so muß v. a. eine gute Querstabilität gewährleistet sein. Die Stabilität eines Schiffes gegen Krängung ist so lange ausreichend, wie das krängende Moment M_K nicht größer wird als das aufrichtende Stabilitätsmoment M_{St}. Der Formschwerpunkt F eines gekrängten Schiffes wandert entsprechend der neuen Unterwasserform aus, das entstandene Kräftepaar aus Auftrieb und Schiffsgewicht bildet das aufrichtende Stabilitätsmoment. Der Schnittpunkt der Auftriebsrichtung mit der Mittschiffsebene wird als Metazentrum M bezeichnet. Den Abstand des Metazentrums von dem Gewichtsschwerpunkt G, also die Strecke MG, nennt man die metazentrische Höhe. Das Schiff ist unstabil, wenn der Hebelarm h des Stabilitätsmomentes und damit die metazentrische Höhe gleich Null werden. Die metazentrische Höhe wird deshalb als anschauliche Größe für die Beurteilung der Stabilität eines Schiffes benutzt.

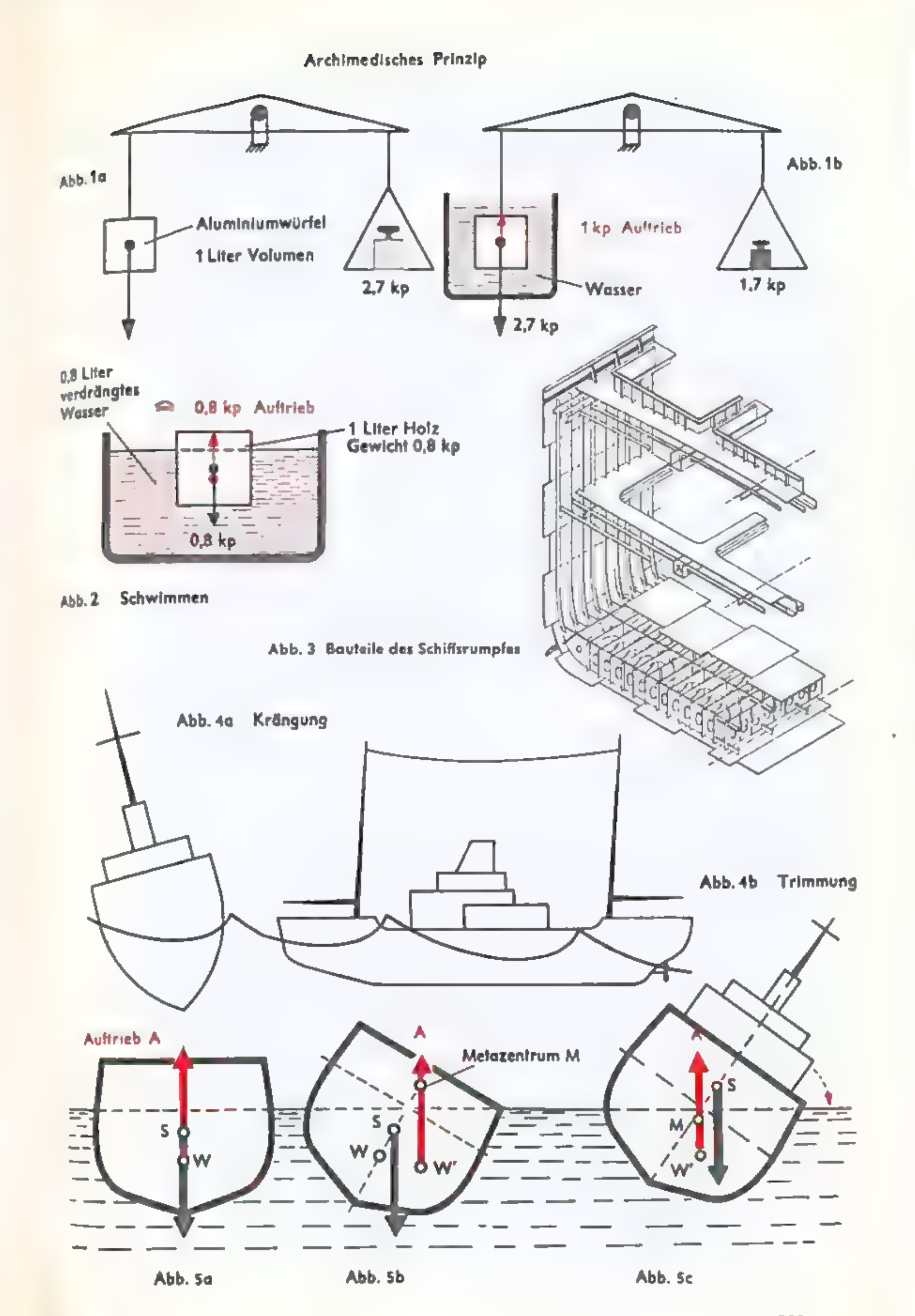


Abb. 2 Schwimmen

Abb. 3 Bauteile des Schiffsrumpfes

SCHIFFSSTABILISIERUNG I

Schiffe führen unter dem Einfluß des Seegangs Winkelbewegungen um ihre Längsachse (Schlingern oder Rollen), um ihre Querachse (Stampfen) und um ihre Vertikalachse (Gieren) aus (Abb. 1), von denen insbesondere die Schlingerbewegung wegen der größeren Amplitude von Schiffsbesatzung und Passagieren unangenehm empfunden wird und hinsichtlich der Stauung des Ladeguts besondere Anforderungen stellt.

Die Schlingerbewegung ist abhängig vom Wellenmoment, verursacht durch den Seegang, vom Trägheitsmoment des Schiffes, bezogen auf die Schlingerachse, vom Dämpfungsmoment, verursacht durch Reibung zwischen Schiffsaußenhaut und Seewasser, und vom Stabilitätsmoment, hervorgerufen durch den waagerechten Abstand der Wirkungslinien von Schiffsgewicht und Auftrieb. Der Dämpfung bzw. Reduzierung dieser Schlingerbewegung dienen die Schlingerdämpfungsanlagen, die entweder passiv wirken, d. h. die eingetretene Schiffsbewegung löst Wirkung der Dämpfungsanlage aus, oder die aktiv arbeiten, d. h. mit einer vorprogrammierten Steuerung werden die Dämpfungsanlagen so gesteuert, daß störendes Moment und Gegenmoment gleichzeitig wirksam werden. Zwar stellen insbesondere die Wellenmomente keinen absolut regelmäßig verlaufenden Einfluß dar, doch können durch die Bemessung und Einregulierung aktivierter Dämpfungsanlagen die Schlingerbewegungen um 75% und mehr reduziert werden. Der größte Effekt wird erzielt, wenn die Schlingerdämpfungsanlage mit der Eigenfrequenz des Schiffes arbeitet, in ihrer Wirkung aber um 90° gegenüber der Schiffsbewegung versetzt ist.

Die einfachste Form der Schlingerdämpfungseinrichtungen bilden die Schlingerkiele (Abb. 2). Sie sind seitlich am Schiff angeordnet und reichen über etwa 30–50% der Schiffslänge. Mit den quer zur Schlingerbewegung stehenden Flächen ergeben sie einen erheblichen Widerstand gegenüber dem umgebenden Wasser. Ihre Wirkung ist vor allem von der Schiffsgeschwindigkeit abhängig; daneben ergeben sie aber auch einen nicht unerheblichen Fahrwiderstand und beeinflussen damit die Schiffsgeschwindigkeit bzw. die Maschinenleistung. Außer den durchlaufenden Schlingerkielen finden sich auch solche, die unterteilt sind, meist stromlinienförmigen Querschnitt haben und darum einen geringeren Einfluß auf die Geschwindigkeit ausüben.

Schlingertanks (Abb. 3) sind an beiden Schiffsseiten angeordnet, durch 2 Leitungen miteinander verbunden und etwa zur Hälfte mit Wasser, Öl oder dergleichen gefüllt. Die untere Leitung ermöglicht das Überströmen des Wassers von der austauchenden Schiffsseite auf die eintauchende Seite, während die obere Leitung dem Luftausgleich zwischen den Tanks dient. Die obere Leitung enthält ein Drosselventil, das entsprechend den Schlingereigenschaften eingestellt ist und daher das Überströmen des Wassers reguliert. Durch diese feste Einstellung ist die Anlage nur in einem begrenzten Bereich der Schlingerbewegung wirklich effektvoll.

Schlingerkreisel (Abb. 4) sind in Ausnutzung der Eigenschaft des schnellaufenden Kreisels, seine Achse raumfest zu halten, benutzt worden, um Schiffe zu stabilisieren (Schlickscher Schiffskreisel). Um einen wirkungsvollen Stabilisierkreisel zu erhalten, mußte er sehr groß und schwer sein. Dies ergab aber wiederum bei der durch die Schlingerbewegung ausgelösten Achsenänderung sehr große und auf einen begrenzten Teil der Schiffkonstruktion wirkende Kräfte, so daß von einer allgemeinen Einführung Abstand genommen wurde.

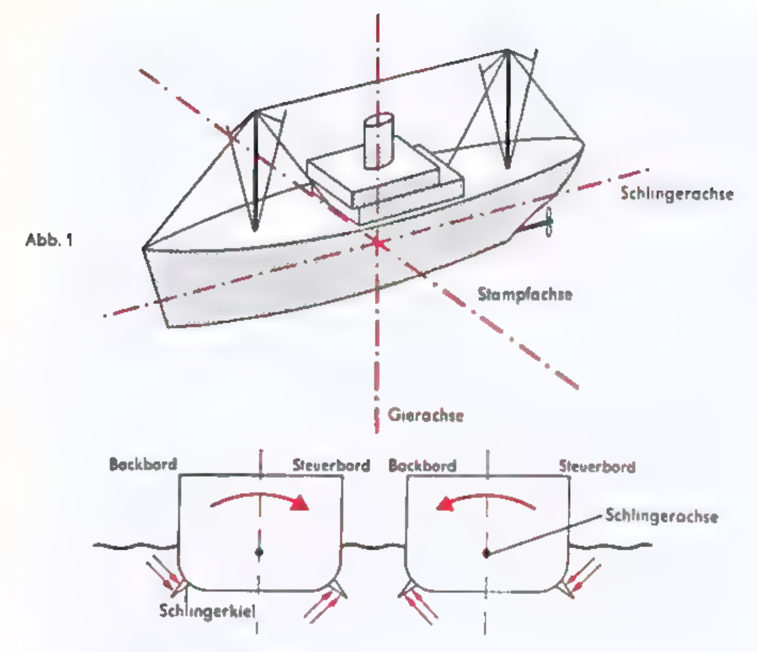


Abb. 1

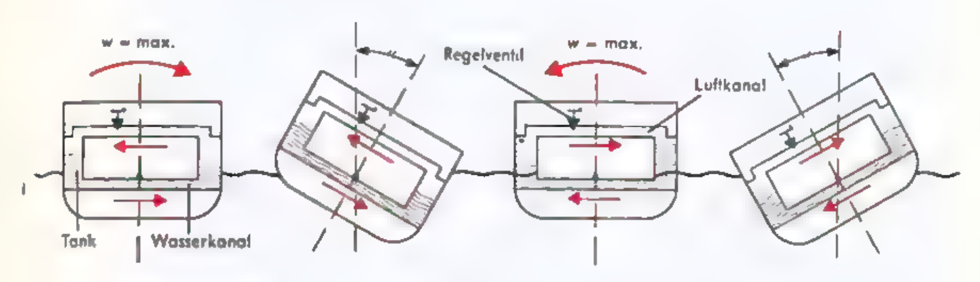


Abb. 2 Schlingerkiel (passiv)

Abb. 3 Schlingertank (passiv)

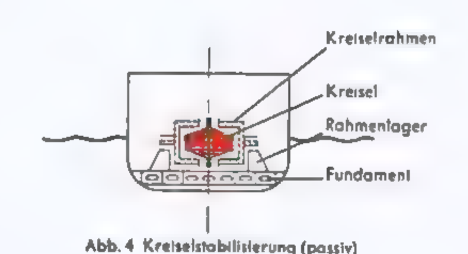


Abb. 4 Kreiselstabilisierung (passiv)

SCHIFFSSTABILISIERUNG II

Der Schlingerwagen (Abb. 5) stellt die einfachste mechanische Art einer aktivierten Schlingerdämpfungsanlage dar. Quer durch das Schiff verläuft ein Schienensystem, auf dem der als schweres Gewicht wirkende Wagen von Bordwand zu Bordwand verfahren werden kann. Ein Elektromotor verfährt den Wagen derart, daß das vom Wagengewicht ausgeübte Moment nach Größe und Richtung dem Wellenmoment entgegengerichtet ist. Die Steuerung des Motors wird von einem Meßkreisel abgeleitet, der mit einer Phasenverschiebung von 90° auf den Motor einwirkt. Diese Anlage kann auch unabhängig von der Schlingerbewegung des Schiffes eingesetzt werden, um z. B. ein stilliegendes Schiff auch in ruhigem Wasser zum Schlingern zu bringen, was für Erprobungs- und Forschungsschiffe unter Umständen notwendig ist.

Aktivierte Schlingertanks (Abb. 6) unterscheiden sich von den bereits vorbeschriebenen Schlingertanks dadurch, daß die Wasserbewegung von einer Schiffsseite nicht von der Druckhöhe und der Wirkung des Drosselventils abhängig gemacht wird, sondern entweder durch eine in den unteren Verbindungskanal eingebaute Pumpe oder durch ein auf die freien Oberflächen der Tanks einwirkendes Gebläse gesteuert wird. Die Steuerbewegung wird wie beim Schlingerwagen von einem Meßkreisel abgeleitet. Auch diese Anlage läßt sich zur Anregung von Schlingerbewegungen eines ruhigliegenden Schiffes benutzen.

Bei einer Anlage zur Flossenstabilisierung (Abb. 7) werden auf beiden Seiten, meist etwa in Mitte Schiff liegend, Flossen angeordnet, die sich um ihre Achse gegenläufig drehen lassen. Infolge des Drehwinkels erhalten sie einen Anstellwinkel gegenüber dem Wasser und rufen damit in der Schlingerbewegungsebene wirkende Kräfte und Momente hervor, die sowohl vom Anstellwinkel als auch von der Schiffsgeschwindigkeit und der Flossengröße abhängen. Durch geeignete Steuerung, die von der Schiffsbewegung (Schlingern und Eigenfahrt) beaufschlagt wird, erhalten die Flossen jeweils die Anstellung, die zum Ausgleich des jeweiligen Wellenmoments notwendig ist. Die optimale Auslegung dieser Anlagen führt dazu, daß sie nur in einem bestimmten Geschwindigkeitsbereich einen hohen Wirkungsgrad haben und deshalb sehr sorgfältig geplant werden müssen. Bei Nichtgebrauch der Stabilisierung können die Flossen entweder in axialer Richtung in das Schiff zurückgezogen werden oder um Achsen, die senkrecht zur Flossenebene stehen, in entsprechende Taschen des Schiffskörpers zurückgeklappt werden.

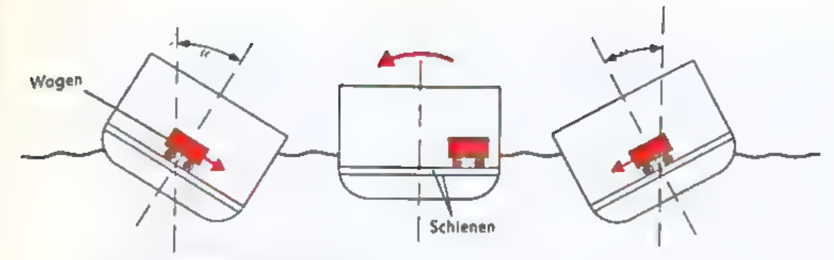


Abb. 5 Wagenstabilisierung (aktiv)

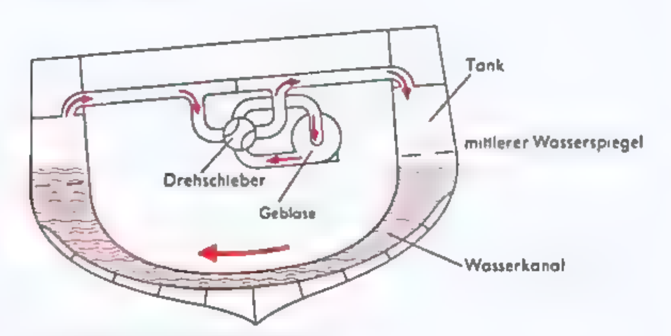
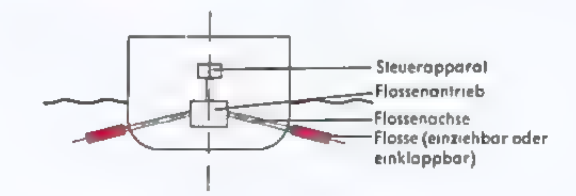


Abb. 6 Aktivierte Tankschlingerdämpfung



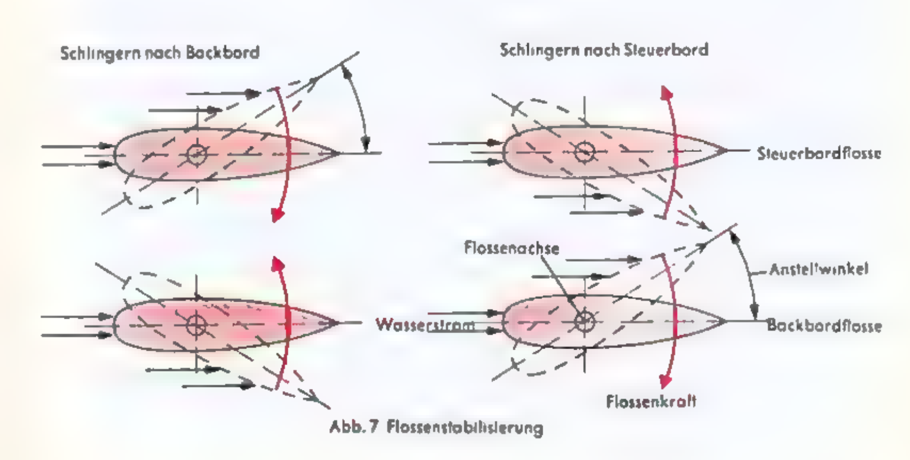


Abb. 7 Flossenstabilisierung

SCHIFFSSCHRAUBE

Die Schiffsschraube hat wie alle Propeller die Aufgabe, eine Stoffmenge (hier Wassermenge) zu beschleunigen und die dabei entstehende Reaktionskraft auszunutzen. Da die Beschleunigung der Massen nach hinten erfolgt, entsteht in derselben Richtung eine Beschleunigungskraft. Ihr entgegengesetzt, also nach vorn gerichtet, wird dadurch eine gleich große Reaktionskraft wirksam (vgl. S. 612), die auf das Schiff übertragen wird und dieses vorwärts treibt (Abb. 2).

In Abb. 1 ist die Entstehung einer Schraube dargestellt. Die drei Halbmesser eines Kreises (a, b und c) drehen sich um ihren Mittelpunkt. Sie überstreichen damit eine Kreisfläche, wobei die äußeren Enden der Halbmesser auf dem Kreisumfang entlanglaufen. Schiebt man nun den Mittelpunkt des Kreises auf einer geraden Linie fort, während sich das ganze System dreht (theoretische Fortschrittsgeschwindigkeit der Schraube), so bilden die Enden der Halbmesser auf dem durch die geradlinige Fortbewegung entstandenen Zylinder eine Schraubenlinie, während die Halbmesser selbst eine schraubenförmig verdrehte Fläche (wie die Stufen einer Wendeltreppe oder die Welle eines Fleischwolfs) überstreichen. Schneidet man aus diesem Zylinder an irgendeiner Stelle eine Scheibe heraus, so erhält man eine dreiflügelige Schiffsschraube mit drei Gängen. Die Ganghöhe ist gleich der fortschreitenden Bewegung des Mittelpunktes bei einer Umdrehung eines Flügels. Moderne Schrauben werden jedoch mit größeren Steigungen als den auf diese Art ermittelten versehen, um sie den strömungstechnischen Bedingungen bei der Fahrt besser anzupassen.

Die von der Schraube zur Fortbewegung des Schiffes nutzbar gemachte Maschinenleistung ist von der Differenz der Geschwindigkeit des anströmenden Wassers (= Schiffsgeschwindigkeit) und der Geschwindigkeit des abströmenden Wassers sowie von der durchgesetzten Wassermenge abhängig. Bei einem anfahrenden Schiff werden kleine Wassermengen stark beschleunigt, d.h. einer großen Geschwindigkeitsänderung unterworfen, beim fahrenden Schiff große Wassermengen wenig beschleunigt.

In einem festen, unnachgiebigen Medium würde das Schiff bei einer Schraubenumdrehung um die Länge einer Ganghöhe weitergeschoben. Da jedoch das Wasser nachgibt, weicht es dem Druck der Schraube etwas aus. Dadurch beträgt die Fortbewegung bei einer Schraubenumdrehung nur etwa 60 bis 70% der Ganghöhe. Die Differenz bis 100% nennt man den Slip der Schraube. Bei jeder Schiffsschraube entsteht auf der Saugseite ein Unterdruck, der um so größer ist, je größer der Anstellwinkel der Flügel und je größer die Drehzahl ist. Da bei zu hohem Unterdruck die Wasserströmung durch Luftausscheidung und Dampfbildung zerreißt — ein Vorgang, den man Kavitation oder Hohlraumbildung nennt —, gibt man schnellaufigen Schiffsschrauben, um die Unterdrücke auf der Saugseite klein zu halten, sehr flache Profile und kleine Anstellwinkel und sehr breite Flügelblätter. Bei der langsamlaufenden Schiffsschraube ist das Gegenteil der Fall (Abb. 3 und 4). Für Ozeanschiffe bevorzugt man große Schrauben mit kleiner Drehzahl (Wassermenge groß, Beschleunigung klein), für die Binnenschiffahrt kleine Schrauben mit großer Drehzahl (Wassermenge klein, Beschleunigung groß).

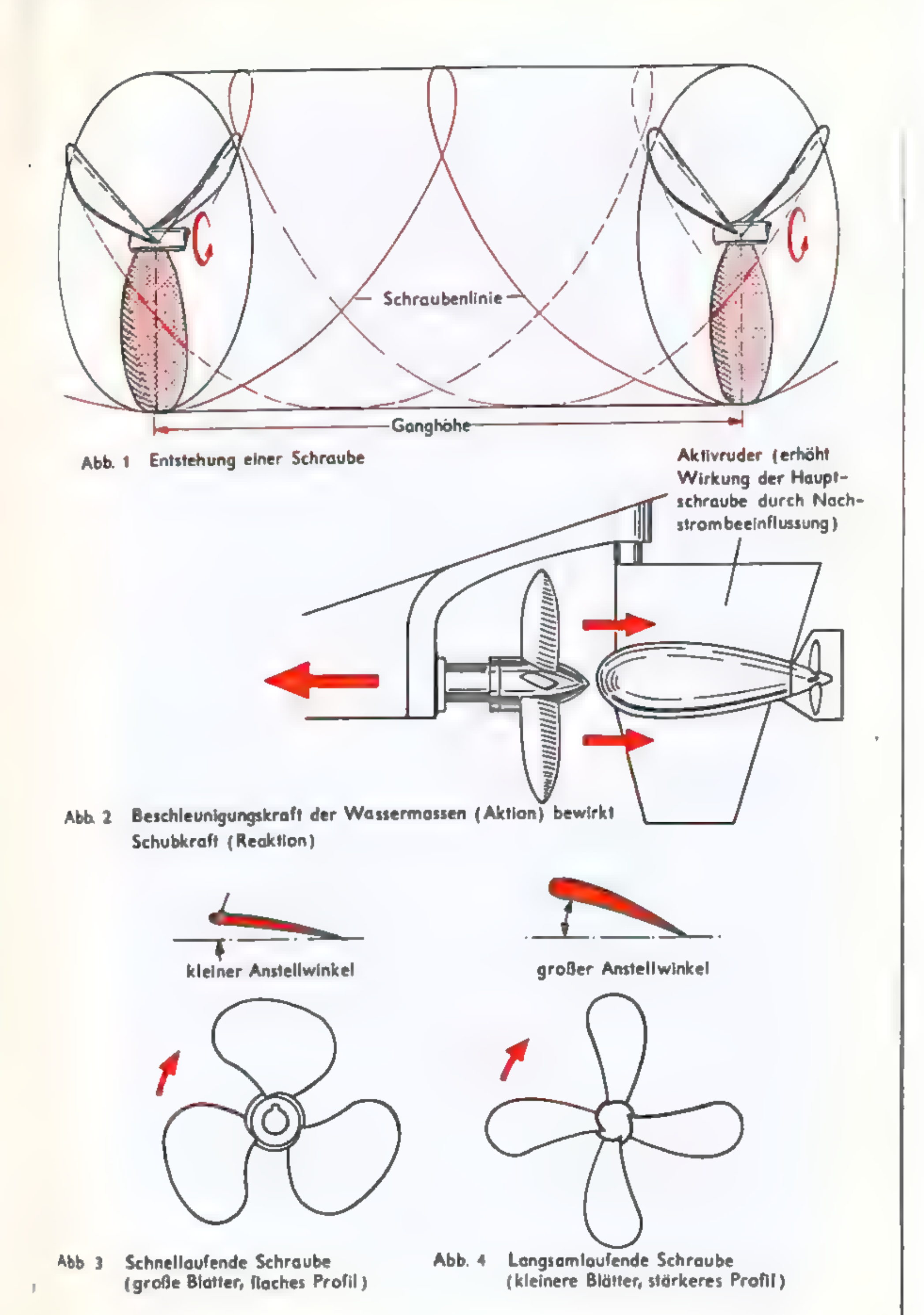


Abb. 1 Entstehung einer Schraube

Abb. 2 Beschleunigungskraft der Wassermassen (Aktion) bewirkt Schubkraft (Reaktion)

Abb. 3 Schnellaufende Schraube (große Blätter, flaches Profil)

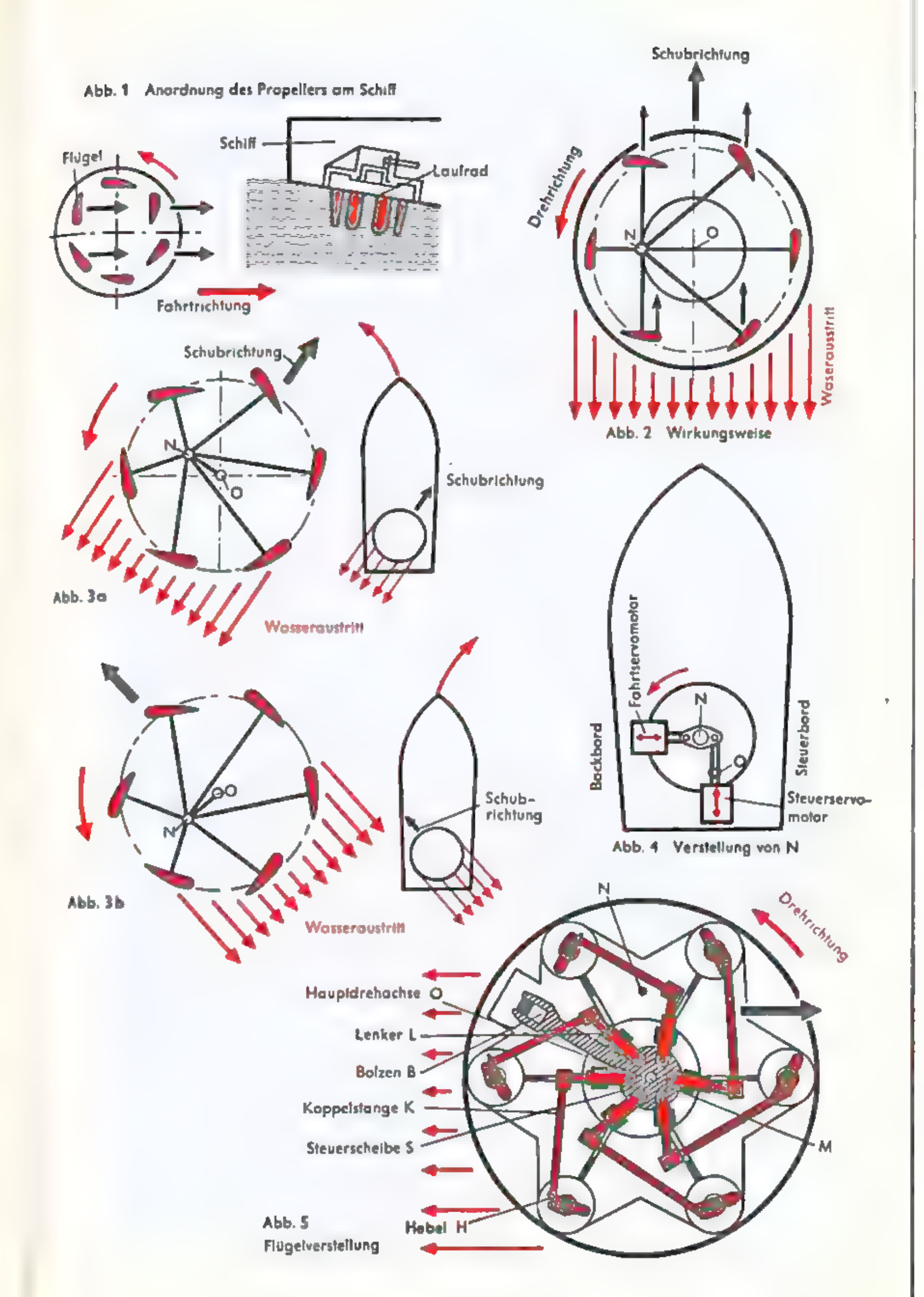
Abb. 4 Langsamlaufende Schraube (kleinere Blätter, stärkeres Profil)

VOITH-SCHNEIDER-PROPELLER

Der Voith-Schneider-Propeller findet als Schiffsantrieb Verwendung. Im Gegensatz zur Schiffsschraube (s. S. 564) besitzt er jedoch eine senkrechte oder nahezu senkrechte Drehachse, die nach unten aus dem Schiffsheck hervorragt (Abb. 1). An dem rotierenden Laufrad sind eine Reihe von nach unten stehenden Flügeln befestigt. Diese besitzen ein tragflächenförmiges Profil. Jeder dieser Flügel kann für sich selbst um eine eigene Achse (die zur Hauptdrehachse des Laufrades parallel liegt) geschwenkt werden. Soll der Propeller bei seiner Drehung einen Schub auf das Schiff ausüben, so muß das Wasser in der Richtung beschleunigen bzw. eine Kraft auf das Wasser in der Richtung ausüben, die der gewünschten Schubrichtung entgegengesetzt liegt. Erreicht wird dies durch entsprechendes Anstellen (s. S. 582) der Flügel gegenüber der Tangente an die Kreisbahn, auf der sich die Flügelmitten bewegen. Würden alle Flügel denselben Anstellwinkel bekommen, so würden sich jedoch die an jedem Flügel entstehenden Kräfte in ihrer Gesamtheit aufheben, der Propeller würde keinen Schub erzeugen. Es muß vielmehr der Anstellwinkel jedes Flügels, während er seine Drehbewegung mit dem Laufrad ausführt, dauernd geändert werden, d. h., jeder Flügel muß während jeder Laufradumdrehung eine Schwingbewegung um seine eigene Achse ausführen. In der Abb. 2 nehmen die Flügel eine Stellung ein, daß sie bei der eingezeichneten Drehrichtung des Laufrades das Wasser in Richtung auf den unteren Buchrand zu aus dem Propeller drücken, wodurch ein Schub in Pfeilrichtung ausgeübt wird. Es ist erkennbar, daß dazu die Flügel, solange sie den in Schubrichtung liegenden (im Bild oben befindlichen) Halbkreis des Laufrades durchlaufen, mit ihrer Vorderkante nach außen geschwenkt werden müssen.

Nur im Augenblick des Übergangs vom oberen zum unteren Halbkreis und umgekehrt tangieren die Flügel die Kreisbahn. Der jeweilige Anstellwinkel der Flügel ist dann richtig, wenn sich alle Senkrechten auf den Flügelmitten in einem gemeinsamen Punkt N schneiden. Von der Lage dieses Punktes N in bezug auf die Hauptdrehachse 0 des Laufrades und vom Drehsinn des Laufrades (der übrigens immer gleichbleibt, damit die tragflächenförmigen Flügel nicht rückwärts laufen müssen) hängt es ab, welche Schubrichtung sich einstellt. Aus der Abb. 2 ist zu ersehen, daß der Anstellwinkel während der Drehung des Laufrades dauernd verändert werden muß, damit die Senkrechte auf den Flügelmitten dauernd durch den gleichbleibenden Punkt N geht. Die Schubrichtung bleibt ja nur dann gleich, wenn sich auch die Lage des Punktes N nicht verändert, obwohl sich das Laufrad dreht. In den Abb. 3a und 3b ist die Lage von N in bezug auf 0 gegenüber der Abb. 2 verändert. Ist N wie in Abb. 3a in den linken oberen Viertelkreis verschoben, so ergibt dies bei der eingezeichneten Drehrichtung des Laufrades Wasseraustritt nach links unten und Schub nach rechts oben. Bei Lage des Punktes N im linken unteren Viertelkreis wie in Abb. 3b und der gleichen Drehrichtung wie in der Abb. 3a entsteht Wasseraustritt nach rechts unten und damit Schub nach links oben. Der Voith-Schneider-Propeller ist also auch zum Steuern zu gebrauchen. Abb. 4 zeigt schematisch, wie Punkt N verschoben werden muß, um bestimmte Schiffsbewegungen zu erzielen.

Abb. 5 zeigt einen Mechanismus für die Flügelbewegung: In der Mitte des Laufrades befindet sich die Steuerscheibe S (schwarz schraffiert), die an der Drehung des Laufrades teilnimmt. An ihr sind die Lenker L angebracht, die in drehbar gelagerten Gleitsteinen geführt sind. Die Koppelstangen K verbinden die Lenker L mit den Hebeln H, die mit den Flügeln verbunden sind. In die Mittelbohrung M der Steuerscheibe greift von oben ein Bolzen ein, der die Mittelbohrung der Steuerscheibe auch bei Drehung derselben an dem gezeichneten Ort M festhält. Es drehen sich daher alle schwarz gezeichneten Teile um die Hauptdrehachse 0. Die Steuerscheibe dagegen dreht sich – mitgenommen vom Bolzen B – um den Punkt M. Dadurch erzeugen die rot gezeichneten Teile die Schwenkbewegung der Flügel.



NAVIGATION I

Unter Navigation versteht man die Standort- und Kursbestimmung von See- und Luftfahrzeugen (zur Flugnavigation vgl. S. 602 ff). In der Seenavigation wird der Standort in der Regel als Schnittpunkt zweier oder mehrerer Standlinien gefunden. Die Standlinien werden durch Anpeilung terrestrischer oder astronomischer Festpunkte ermittelt. Terrestrische Festpunkte sind in küstennahen Gewässern markante Landmarken, Seezeichen in Gestalt von Tonnen, Bojen und Baken, Leuchtzeichen (Feuer) von Leuchttürmen, die weit über die Entfernungen hinausreichen, die der Landsicht entsprechen. In Abb. 1 ist die Standortbestimmung mit Hilfe zweier Landmarken oder Seezeichen gezeigt. Mit einem Sextanten (vgl. S. 570) werden die Winkel α zwischen den beiden Festpunkten A und B, deren Abstand bekannt ist, von den jeweiligen Standorten aus gemessen, ebenso die Winkel β einer der beiden Standlinien gegen die vom Schiffskompaß angezeigte Nordrichtung. Da geographische Länge und Breite sowie der Abstand der Festpunkte bekannt sind, kennt man in den Dreiecken ABS bzw. ABS′ eine Seite und 2 Winkel. Damit lassen sich die Länge der Standlinien sowie die geographischen Koordinaten des Standortes S bzw. S′ bestimmen. Auf hoher See ist das Schiff auf astronomische oder Funkpeilung (s. S. 602 ff.) angewiesen. Bei der astronomischen Peilung (Abb. 2) wird z. B. ein Stern im Süden anvisiert und seine Kulminationshöhe, d. h. der Winkel zwischen Sichtlinie und Horizont bestimmt. Aus Tabellenwerken (astronomische Jahrbücher) wird der Standort des Sternes am Himmel entnommen. Das genau gehende Schiffschronometer legt die Zeit fest. Daraus ist dann der Standort des Schiffes zu entnehmen. Die durch Peilung bestimmten Standorte werden zur Kursbestimmung in Seekarten eingetragen. Auf den Seekarten sind auch die Meerestiefen angegeben. Für die Navigation in Küstennähe ist daher auch die Bestimmung der Meerestiefe durch Lotung sehr wichtig. Das Echolot (s. S. 570) ist ein zu diesem Zweck gegenwärtig viel benutztes Tiefenmeßgerät.

Als geplanten Kurs zwischen zwei Orten A und B wählt man entweder die Orthodrome, d. h. die kürzeste Verbindung als Teil eines Großkreises, oder die Loxodrome (Abb. 3a). Dieser Kurs zeichnet sich dadurch aus, daß er die Längenkreise stets unter dem gleichen Winkel schneidet. In einer Karte in Mercatorprojektion erscheint daher die Loxodrome als gerade Linie (Abb. 3b). Die Loxodrome ist jedoch stets länger als die Orthodrome.

Die Funkpeilung gibt ähnlich wie die Leuchtturmpeilung Bezugspunkte, deren geographische Lage und Art des abgegebenen Feuers (Kennung) in Tabellenwerken angegeben ist. In Abb. 4 ist als Beispiel die Kennung eines Drehfeuers angegeben, bei dem periodisch kurze und lange Zeichen ausgestrahlt werden.

Für die Einhaltung des Kurses, die Regulierung der Fahrtgeschwindigkeit und das Manövrieren in Schleusen und Häfen oder Gefahrensituationen dient als wichtiges Hilfsmittel der Maschinentelegraph (Abb. 5). Er befindet sich auf der Kommandobrücke des Schiffes und wird vom Schiffsführer (in der Regel dem Kapitän) verwendet, um dem Leitenden Ingenieur im Maschinenraum Anweisungen über den Gang der Maschine zu erteilen. Durch Einstellung des Geberstellhebels auf einen bestimmten Befehl wird ein Seilzug betätigt (bei moderneren Geräten ein elektrisches Signal übertragen). Von der Maschinenzentrale aus wird das Signal „quittiert", indem dort ein Quittungsgeber am Empfänger auf den entsprechenden Befehlssektor eingestellt wird. Bei fehlender Übereinstimmung ertönt ein Alarmsignal.

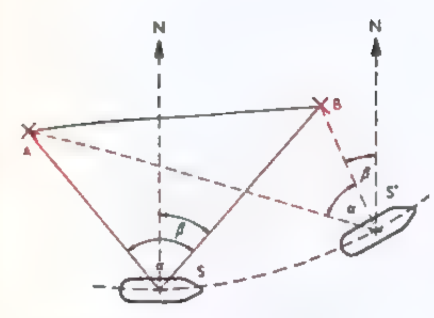


Abb. 1 Standortbestimmung mit Hilfe von Seezeichen

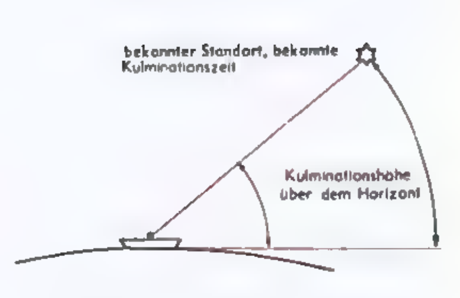


Abb. 2 Standortbestimmung mit Hilfe eines Gestirns

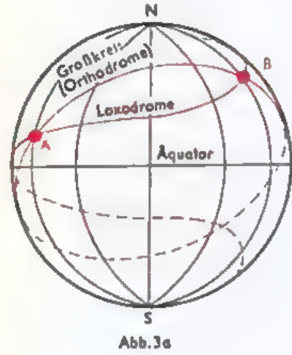


Abb. 3a

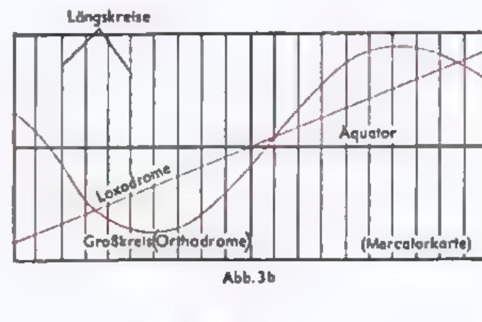
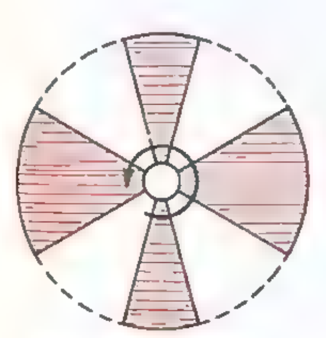


Abb. 3b


Abb. 4 Kennung eines Drehfeuers

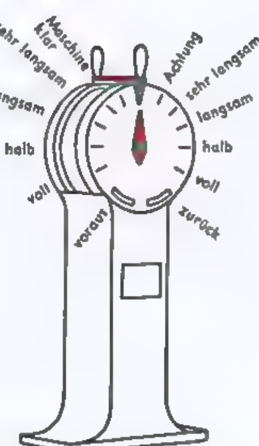


Abb. 5 Maschinentelegraph

NAVIGATION II

Ein wichtiges Navigationshilfsmittel ist neben dem bereits genannten Chronometer der Kompaß (Magnet- oder Kreiselkompaß; S. s. 572). Nach dem Kompaß wird das Schiff unmittelbar gesteuert. Die Kursangaben erfolgen nach der Einteilung der Windrose. Eines der ältesten Hilfsmittel für die astronomische Peilung ist der *Sextant*, dessen grundsätzliche Wirkungsweise aus Abb. 6 hervorgeht. Durch einen zur Hälfte versilberten Spiegel visiert der Beobachter durch das Loch eines Diopters einen Stern an. Einen zweiten Stern bringt er durch Verstellen eines drehbaren Spiegels (unter Reflexion des Lichtstrahles am versilberten Teil des ersten Spiegels) in sein Gesichtsfeld und damit das Licht beider Sterne für das Auge zur Deckung. Dann läßt sich der Winkelabstand beider Sterne auf der 60°-Teilung (daher der Name Sextant) durch die Stellung des Dreharmes des beweglichen Spiegels ablesen. Die Fahrtgeschwindigkeit, die ebenfalls für die Kursfestlegung wichtig ist, wird mit dem *Log* gemessen. Heute benutzt man meist das sog. Patentlog (Abb. 7), bei dem eine im Wasser nachgeschleppte kleine Schraube ihre Umdrehungen über eine biegsame Achse auf ein Zifferblatt überträgt, auf dem die Geschwindigkeit abgelesen werden kann. Das modernste Log ist der *Staudruckmesser* (Abb. 8). Seine Wirkungsweise beruht auf dem Bernoullischen Gesetz (vgl. S. 18). Er besteht aus einem Rohr, das in der Stirnseite und an den Seiten Öffnungen besitzt. Der in der aus der Abbildung ersichtlichen Weise gemessene Druckunterschied ist dem Quadrat der Fahrtgeschwindigkeit proportional. Die gleiche Apparatur wird auch bei der Flugnavigation (vgl. S. 604) sowie zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten in der Hydro- und Aerodynamik verwendet. Zur Feststellung der Meerestiefen, die aufgrund von Seekarten ein weiteres Hilfsmittel zur Ortsbestimmung sind, dient das *Echolot*. Eine Ausführungsform zeigt Abb. 10. Dort ist eine Methode dargestellt, die sich durch ein besonders einfaches Verfahren der Kurzzeitmessung auszeichnet.

Am Boden des Schiffes sind Schallsender und Schallempfänger so angebracht, daß nur der am Meeresboden reflektierte Schall den Empfänger treffen kann. Die Betätigung des Senders geschieht durch einen rotierenden Kontakt, der von der Welle der Kurzzeit-Meßapparatur betätigt wird und einen Kondensator über den elektromagnetischen Schallsender entlädt, so daß ein kurzer Schallimpuls ausgestrahlt wird. Die Kurzzeit-Meßapparatur besteht aus einer vor einer Zeitskala rotierenden Neon-Glimmlampe. Durchläuft sie die Nullstellung, so wird der Schallimpuls ausgelöst. Seine Laufzeit zum Meeresboden und zurück zum Schallempfänger (Mikrophon) wird durch ein Aufleuchten der Glimmlampe, die sich inzwischen weitergedreht hat, auf der Zeitskala markiert bzw. abgelesen. Da der reflektierte Schallimpuls im Empfänger eine zu geringe Wirkung auslöst, die nicht ausreicht, die Glimmlampe zum Aufleuchten zu bringen, ist die Zwischenschaltung eines Verstärkers erforderlich. Während man beim üblichen Echolot vorwiegend mit Ultraschall arbeitet (Frequenz 20 000 Hz), bedient man sich für Tiefsee-Echolotungen gern eines Hörschallsenders (3 600 Hz). Sein prinzipieller Aufbau ist in Abb. 9 dargestellt. Die Spule wird von einem Wechselstrom der Frequenz 3 600 Hz durchflossen, so daß sich die lamellierten Eisenkerne in diesem Rhythmus anziehen und — infolge der Elastizität der Membran — wieder auseinanderfedern. Andere Sendertypen bedienen sich der Erscheinung der Magnetostriktion bzw. des Piezoeffektes.

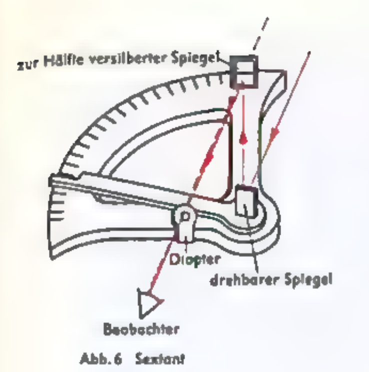


Abb. 6 Sextant

Zählwerk
Schwungrad
Propeller

Abb. 7 Patentlog

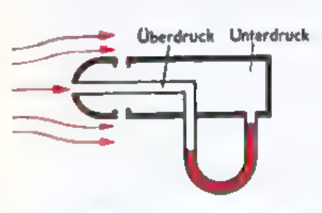


Abb. 8 Staudruckmesser (Prandtl-Rohr)

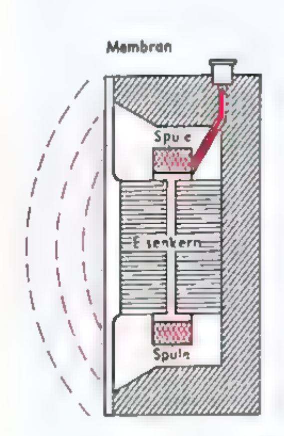


Abb. 9 Elektromagnetischer Schallsender

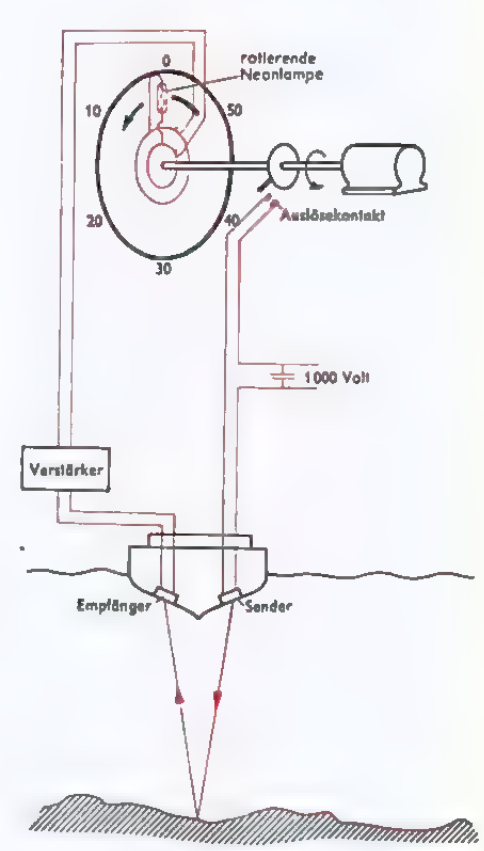


Abb. 10 Atlas-Echolot mit Kurzzeitmesser (nach Behm)

KOMPASS

Die Eigenschaft gewisser Eisenerze, natürlichen Magnetismus zu zeigen, läßt sich auf unsere Vorstellungen vom Aufbau des Atoms zurückführen (Abb. 1). Ein einzelnes, einen Atomkern umkreisendes Elektron wirkt wie ein Kreisstrom, der wiederum einem magnetischen Blatt gleicht. Wir können uns daher Eisen aus einer Fülle solcher Elementarmagnete aufgebaut denken, die gruppenweise (sog. Weißsche Bezirke) parallel ausgerichtet sind. In der Regel hebt sich der Magnetismus der einzelnen Bezirke nach außen hin auf (Abb. 2 a). Hat jedoch durch äußere Einflüsse eine einheitliche Ausrichtung stattgefunden, so bleibt diese weitgehend erhalten (Abb. 2 b). Solche Eisenstücke zeigen einen natürlichen Magnetismus. Auch die Erde als Ganzes weist solch einen natürlichen Magnetismus auf (Abb. 3). Die magnetische Achse ist jedoch gegen die Drehachse geneigt. Die magnetischen Pole fallen mit den geographischen Polen nicht zusammen. Das Magnetfeld der Erde wird in der Schiffahrt zur Richtungsorientierung auf den Weltmeeren benutzt. Man bedient sich dabei des Magnetkompasses. Er besteht aus einem unmagnetischen Gehäuse (z.B. Messing oder Preßstoff), in dem auf einer Spitze leicht drehbar gelagert eine Magnetnadel über einer Windrose spielt (Abb. 4). Die Magnetnadel stellt sich dabei so ein, daß sie mit dem einen Pol — wir nennen ihn den magnetischen Nordpol — ungefähr in die Richtung des geographischen Nordpols weist. In der Nähe des geographischen Nordpols der Erde befindet sich nach dieser Festsetzung demnach der magnetische Südpol der Erde. Die Abweichung der Einstellrichtung der Magnetnadel von der geographischen Nordsüdrichtung bezeichnet man als Mißweisung. Sie ist von Ort zu Ort veränderlich, beträgt im deutschen Raum zwischen 2 und 4° und wird bestimmt durch den Verlauf der horizontalen Komponente des Erdmagnetfeldes (magnetische Deklination). Den vertikalen Verlauf der magnetischen Feldlinien des Erdfeldes kann man mittels einer Magnetnadel mit horizontaler Achse bestimmen (Abb. 5; magnetische Inklination, Inklinationsnadel). Ist auf der Windrose des Kompasses die Mißweisung angegeben bzw. der Wert der magnetischen Deklination aus Tabellen bekannt, so gestattet der Magnetkompaß die Festlegung der genauen Himmelsrichtungen. Nach dem Kompaß wird in der Schiffahrt der Kurs festgelegt. Außer dem Magnetkompaß verwendet man auch den Kreiselkompaß. Er beruht darauf, daß ein über seinem Schwerpunkt drehbar aufgehängter Kreisel seine Drehachse parallel zur Drehachse der Erde zu stellen sucht (Abb. 6). Zur Erklärung dieser Kreiselwirkung greifen wir auf die besonderen Eigenschaften eines Kreisels zurück. Der Einfachheit halber denken wir uns dabei einen Kreisel in west-östlicher Richtung auf dem Erdäquator aufgestellt (Abb. 6, Stellung I). Mit der Erddrehung wird er nach einer bestimmten Zeit in die Stellung II gedreht worden sein. Da er die Tendenz hat, seine Achsenrichtung beizubehalten, wird bei der Art der Aufhängung sein Schwerpunkt angehoben. Daher übt die Schwerkraft ein Drehmoment auf ihn aus, das den Kreisel samt Lagerung zurückzudrehen versucht (kleine schwarze Pfeile). Infolgedessen ändert sich die Richtung der Drehachse (des Dralles) in Richtung des Momentes, d.h. im gezeichneten Falle senkrecht zur Zeichenebene. Dies bedeutet eine Ausrichtung des Kreisels in nord-südlicher Richtung. Schiffe sind weitgehend mit Kreiselkompassen, die einen verhältnismäßig leichten Anschluß von Tochterkompassen ermöglichen, ausgestattet.

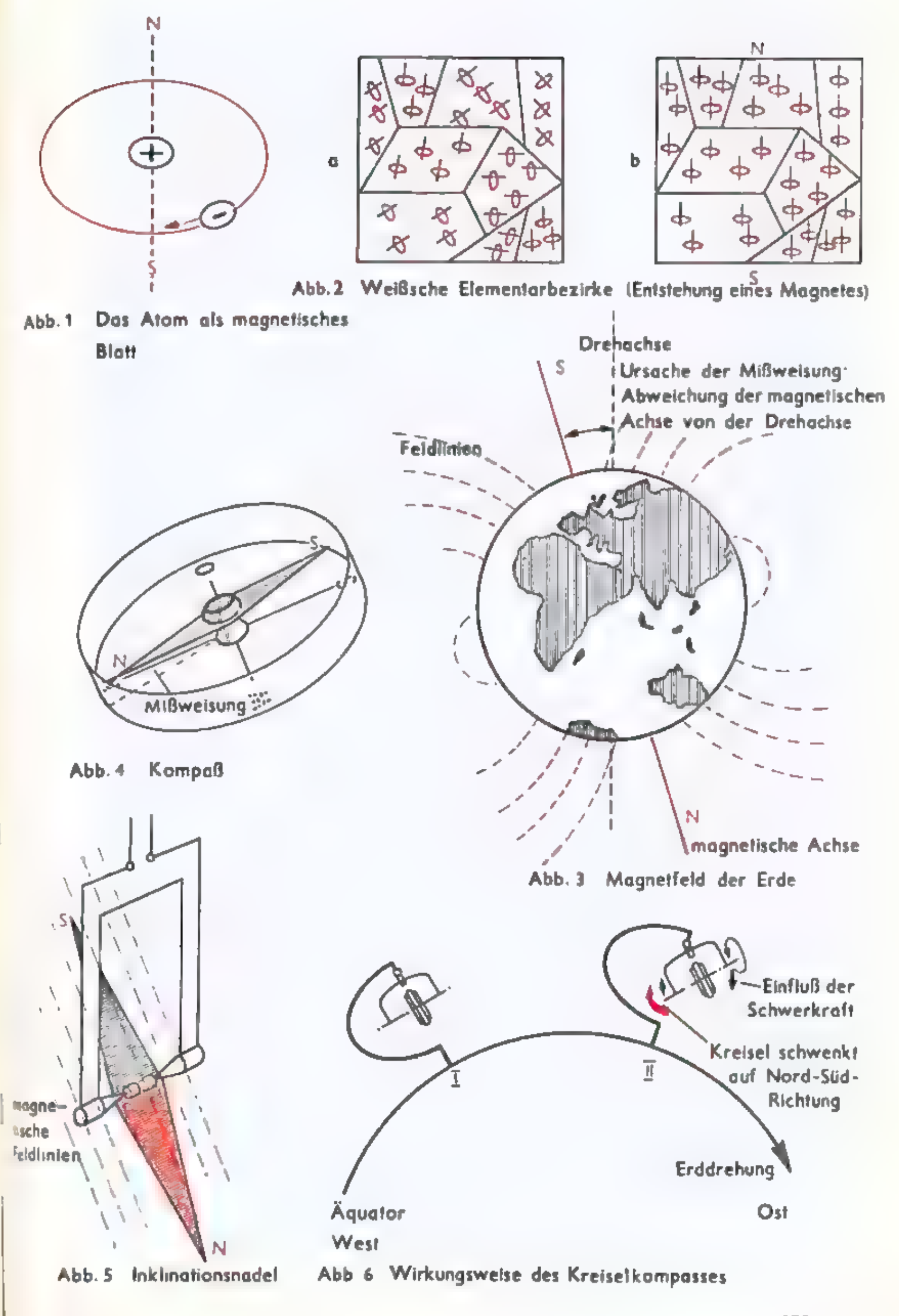


Abb. 1 Das Atom als magnetisches Blatt

Abb. 2 Weißsche Elementarbezirke (Entstehung eines Magnetes)

Abb. 3 Magnetfeld der Erde

Abb. 4 Kompaß

Abb. 5 Inklinationsnadel

Abb 6 Wirkungsweise des Kreiselkompasses

UNTERSEEBOOTE I

U-Boote sind Schiffe, die sowohl wie normale Schiffe fahren, als auch unter die Wasseroberfläche tauchen können (Abb. 1a–1e; U-Boot Typ XXIII). Die dazu erforderlichen Gewichts- und Verdrängungszustände werden in einschlägigen Flottenhandbüchern durch zwei Zahlen gekennzeichnet, z. B. durch die Angabe $\frac{1420}{2425}$. Die obere Zahl gilt für das aufgetauchte Boot, die untere für das getaucht fahrende Boot. Die derzeitigen Größen der U-Boote liegen bei etwa $\frac{330}{430}$ ts für küstennah operierende Boote (etwa 42 m lang) und bis zu $\frac{7000}{9000}$ ts für Boote bei weltweitem Einsatz (etwa 128 m lang).

Das aufgetaucht fahrende U-Boot verhält sich hinsichtlich seiner Schwimm- und Stabilitätseigenschaften wie ein normales Schiff, das heißt, es verdrängt soviel Wasser, wie es selbst wiegt. Das getaucht fahrende Boot soll sich im Schwebezustand befinden, d. h., sein Eigengewicht soll dem Gewicht des verdrängten Wassers genau entsprechen. Dieser Zustand ist aber z. B. durch den laufenden Verbrauch von Brennstoff und Lebensmitteln praktisch und auf die Dauer nicht zu erreichen. Zusätzlich ergibt sich noch die Forderung, daß die Wirkungslinie des Gewichtsschwerpunktes mit der des Verdrängungsschwerpunktes zusammenfällt. Da diese beiden Forderungen in der Praxis nicht völlig zu erfüllen sind, kann das U-Boot unter Wasser nicht „auf der Stelle treten"; es muß stets „kleine Fahrt" machen und durch Tiefenrudermanöver auf Tiefe gehalten werden.

Der Hauptteil des U-Boots ist der Druckkörper, der meist kreisförmigen Querschnitt hat, weil diese Bauform die günstigste Aufnahme des allseitig wirkenden Wasserdrucks ermöglicht. Zehn Meter Tauchtiefe ergeben einen Wasserdruck von 1 kp/cm^2, entsprechend einem Druck von 10000 kp/m^2. Die Enden des Druckkörpers werden durch Böden abgeschlossen, die aus Festigkeitsgründen vielfach die Form einer Kugelkalotte haben. Durch die Böden werden die Antriebswellen und die Torpedoausstoßrohre nach außen geführt. Etwa in Bootsmitte ist der druckfeste Kommandoturm mit den Einsteigluken angeordnet. In oder unter dem Druckkörper befinden sich die Tauch-, Trimm- und Regelzellen. Durch Fluten dieser Zellen kann der Gewichtszustand des Bootes soweit verändert werden, daß es taucht (Abb. 1 a–1 e).

Den Trimmzellen fällt dabei die Aufgabe der Verlagerung des Schwerpunktes (Bild 2a—e, S. 577) zu. Die Regelzellen dienen dem Ausgleich kleiner Gewichtsunterschiede. Das Tauchen eines U-Bootes kann durch gleichzeitiges Fluten der Tauchzellen und Betätigen der Tiefenruder bei hoher Fahrtstufe beschleunigt werden.

Zum Auftauchen des Bootes werden die Zellen mit Preßluft leergeblasen, wodurch das Boot um das Gewicht des ausgeblasenen Wassers leichter wird.

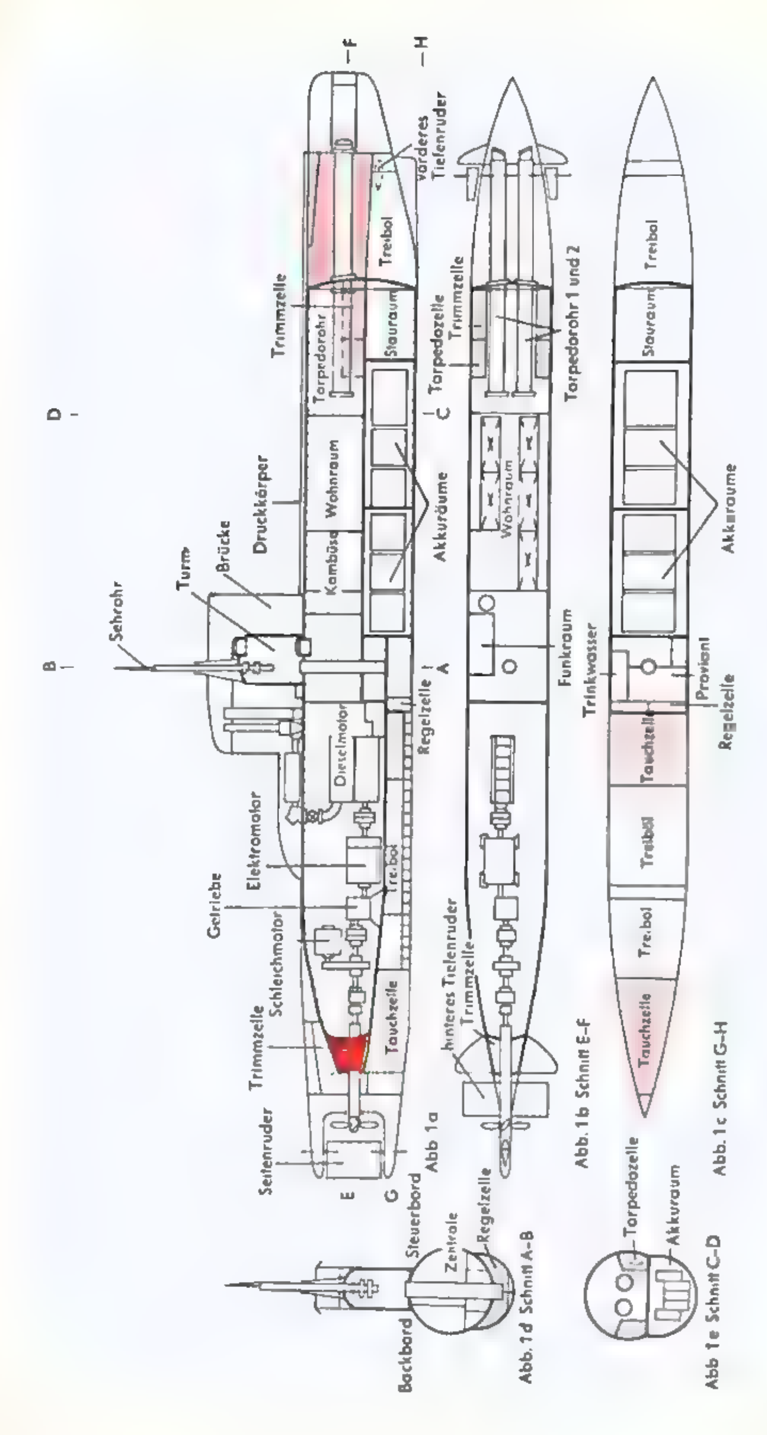


Abb. 1a
Abb. 1b Schnitt E–F
Abb. 1c Schnitt G–H
Abb. 1d Schnitt A–B
Abb. 1e Schnitt C–D

UNTERSEEBOOTE II

U-Boote mit konventionellem Antrieb haben als Hauptmaschine einen Dieselmotor, der aber zu seinem Betrieb hinreichend mit Frischluft versorgt werden muß. Während früher der Dieselmotor nur bei Überwasserfahrt benutzt werden konnte und bei Unterwasserfahrt auf einen batteriegespeisten Elektromotor übergegangen wurde, machte die Einführung des Schnorchels (Abb. 3a und 3b, S. 579) unter bestimmten Voraussetzungen jetzt auch die Unterwasserfahrt mit dem Dieselmotor möglich. Der Schnorchel ist ein röhrenförmiger Mast, der das Ansaugen von Frischluft während der Unterwasserfahrt auf „Schnorcheltiefe" ermöglicht, weil er durch seine Ventileinrichtung das Eindringen von Wasser verhindert, wenn Wellen das obere Mastende überspülen. Früher war der Schnorchelmast umlegbar vor oder hinter dem Kommandoturm angeordnet; heute wird er ein- und ausfahrbar eingerichtet. Für das möglichst geräuscharme Fahren mit kleinster Geschwindigkeit („Schleichfahrt") ist ein Elektromotor mit kleiner Leistung vorgesehen, um den großen Elektromotor nicht mit unwirtschaftlicher Belastung fahren zu müssen. Der ideale Antrieb für U-Boote ist der Kernenergieantrieb, der es gestattet, das Boot nahezu unbegrenzte Zeit unter Wasser zu halten. Das Gewicht des Reaktors und der notwendigen Sicherheitseinrichtungen ist aber so groß, daß der Einbau einer Kernenergieantriebsanlage nur in großen U-Booten durchgeführt werden kann, abgesehen von den Kosten einer solchen Anlage.

Die Steuerung des Bootes erfolgt über Seiten- und Tiefenruder. Das Seitenruder ist in herkömmlicher Weise am Heck angeordnet, während die Tiefenruder am Bug und am Heck vorgesehen werden (Abb. 1a und b, S. 575).

Die jeweilige Lage der Ruder wird den Rudergängern durch Ruderlagenanzeiger sichtbar gemacht. Da durch das Fehlen eines sichtbaren Horizonts kein Gefühl für die Horizontallage des Bootes besteht, wird durch Anordnung von Pendeln, Libellen (Wasserwaage) oder Kreiseln die Lage des Bootes im Vergleich zum Horizont angezeigt.

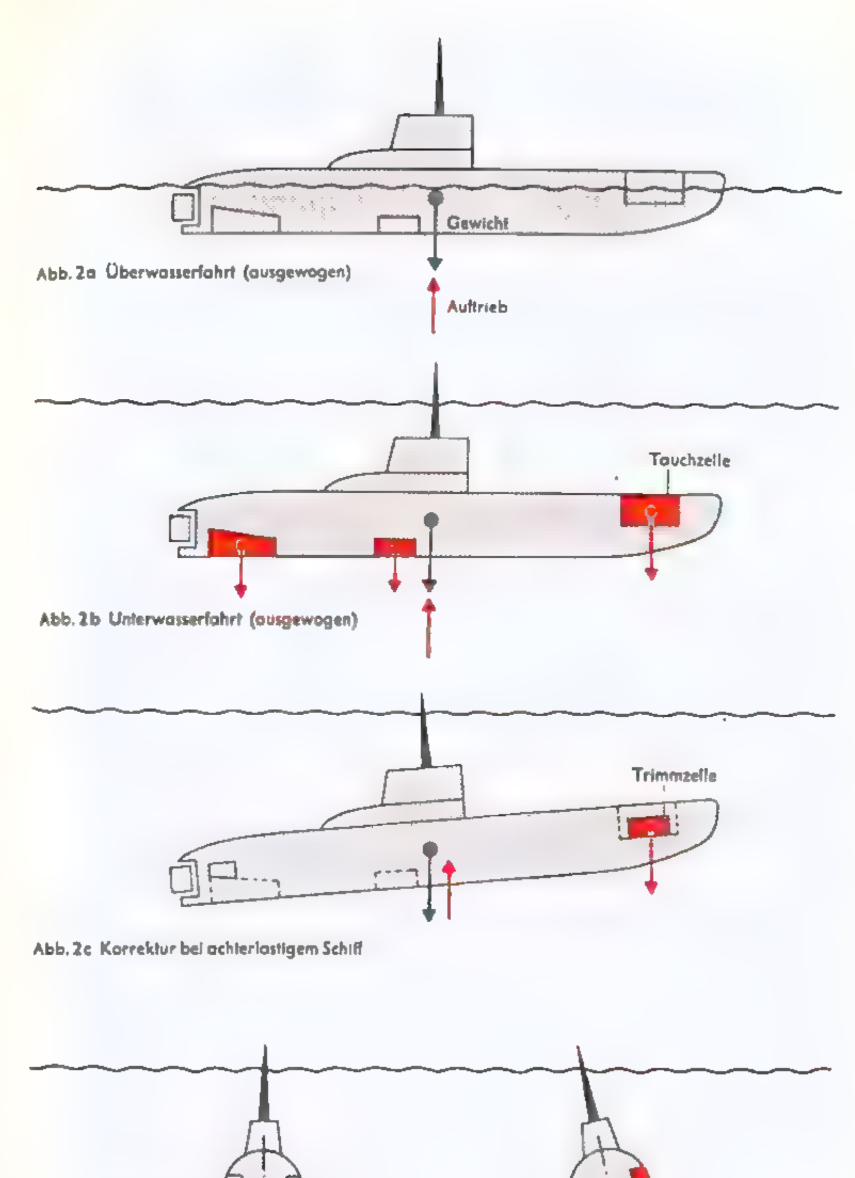


Abb. 2a Überwasserfahrt (ausgewogen)

Abb. 2b Unterwasserfahrt (ausgewogen)

Abb. 2c Korrektur bei achterlastigem Schiff

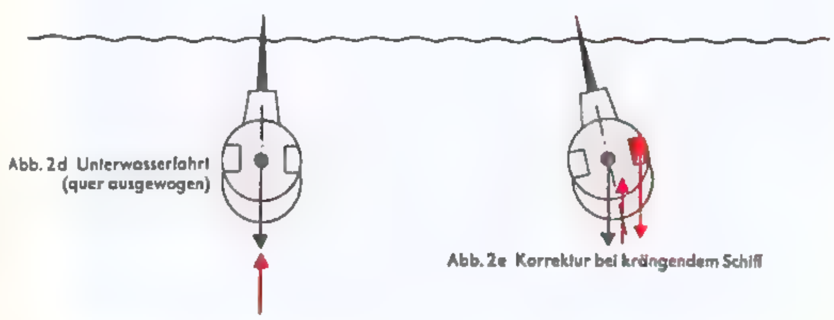


Abb. 2d Unterwasserfahrt (quer ausgewogen)

Abb. 2e Korrektur bei krängendem Schiff

UNTERSEEBOOTE III

Die Tauchtiefe von U-Booten wird durch einen vom Wasserdruck gesteuerten Tiefenmesser festgestellt. Zur Messung der Wassertiefe unter dem Boot dient ein Echolot (vgl. S. 570), bei dem ein Schallimpuls nach unten ausgesendet wird und man die Zeit bis zur Rückkehr seines Echos mißt. Die Schallaufzeit gibt in Verbindung mit der bekannten Schallgeschwindigkeit im Wasser (1500 m/s) die Wassertiefe unter dem Boot an, was insbesondere in flachen Gewässern bedeutsam ist. Den Schiffskurs, bezogen auf die Nordrichtung, vermittelt ein Kreiselkompaß (vgl. S. 572). Zur gelegentlichen Orientierung über das Gefechtsfeld sind Sehrohre angeordnet, die bis dicht über die Wasseroberfläche ausgefahren werden und sich rundum schwenken lassen (Abb. 4a und 4b). Die für die Navigation notwendigen Angaben der Schiffsgeschwindigkeit werden in einer besonderen Geschwindigkeitsmeßanlage ermittelt. Mit gewisser Annäherung kann die jeweilige Schiffsgeschwindigkeit auch aus der Propellerdrehzahl errechnet werden.
Bei jedem Auftauchen werden alle Möglichkeiten zur Kontrolle des Schiffsstandorts ausgenutzt, sei es optisch durch Anpeilen von Marken an Land oder von astronomischen Objekten, funktechnisch durch Funkpeiler usw. (vgl. S. 568–573). Große U-Boote, die für lange Unterwasserfahrt eingerichtet sind, arbeiten mit einem Trägheitsnavigationssystem (vgl. S. 660), das alle während der Fahrt auftretenden Beschleunigungen mißt und durch zweimalige Integration den zurückgelegten Weg in einem vorbestimmten Koordinatensystem errechnet.
Als Bewaffnung führen die meisten U-Boote Torpedos mit sich, die aus Unterwasserausstoßrohren abgeschossen werden. Die Rohre können sowohl am Heck als auch am Bug des Bootes angeordnet werden (Abb. 1, S. 575). Auf großen Booten finden sich heute auch Raketen, die in besonderen Startrohren untergebracht sind und unter Wasser in vertikaler Richtung gestartet werden können. Aus den Unterwassertorpedorohren können auch U-Jagd-Raketentorpedos ausgestoßen werden.
Auf die Verwendung von Artillerie auf U-Booten wird heute verzichtet, weil das Schießen nur vom aufgetauchten Boot aus möglich ist, was bei der gegebenen Entdeckungsmöglichkeit durch Radar usw. für das Boot selbst viel zu gefährlich ist.
Zur Bekämpfung getauchter U-Boote werden Wasserbomben, U-Jagdraketen und U-Jagdtorpedos eingesetzt; Grundlagen hierfür sind die meist akustisch ermittelten Daten über Standort und Bewegung des U-Bootes. Die Wirkung der U-Jagdwaffen ist in der Hauptsache auf die Beschädigung des Druckkörpers abgestellt, um zu erreichen, daß das Boot nicht mehr auftauchen kann.
Zur Rettung der Besatzung aus nicht mehr auftauchfähigen Booten in nicht zu großer Wassertiefe befinden sich Tauchretter an Bord, die auf Nase und Mund aufgeklemmt werden und das Eindringen von Wasser in die Atemorgane während des Auftauchens verhindern. Die Besatzung wird dazu einzeln durch die im Kommandoturm durch die beiden Luken gebildete Schleuse durchgeschleust und mit der beim Öffnen des oberen Luks aufsteigenden Luftblase mit nach oben gerissen.

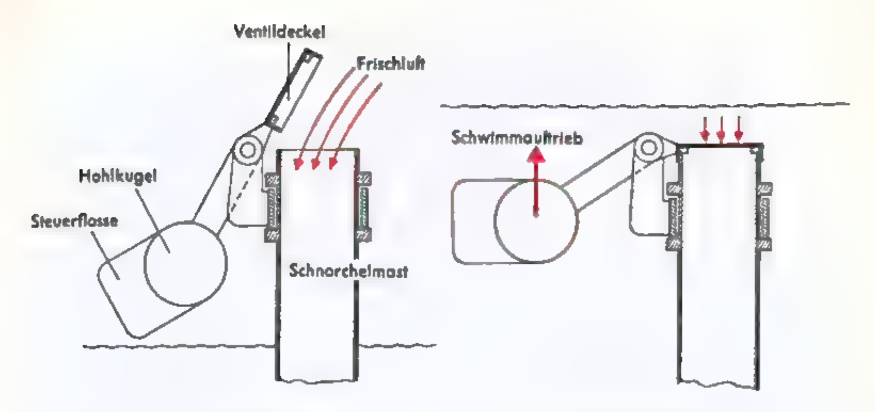


Abb. 3a Schnorchel (ausgefahren)   Abb. 3b Schnorchel (eingezogen)

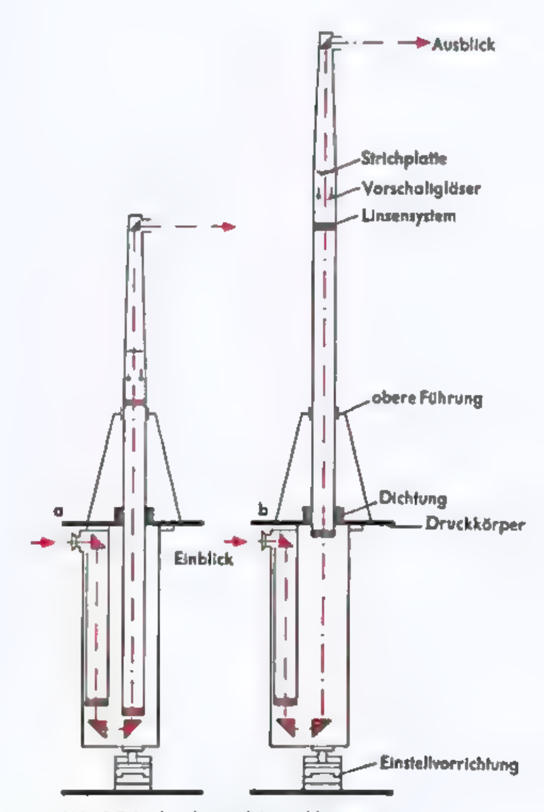


Abb. 4 Sehrohr a) eingefahren b) ausgefahren

DAS SEGELN

Segeln ist die Fortbewegung von Schiffen oder Booten unter Ausnutzung des Windes mit Hilfe eines oder mehrerer Segel. Die modernste Segelform ist das dreieckige Hochsegel (Abb. 1, Großsegel). Hochsegel haben nur ein Fall, an dem sie geheißt oder gefiert werden (Abb. 1, Fock und Klüver). Durch ihre Dreiecksform reichen Hochsegel gegenüber anderen Segeltypen (z. B. dem trapezförmigen Gaffelsegel) bei gleicher Segelfläche einmal weit höher und werden auch von Winden, die nicht bis aufs Wasser hinabreichen, besser erfaßt, zum anderen haben sie eine aerodynamisch günstige längere Anschnittkante. Die Stellung des Segels zu Fahrt- und Windrichtung wird durch die Schot (Segelleine) geregelt.

Früher konnten Segler nur vor dem Wind (Abb. 2a) oder mit Backstagswind (Abb. 2b) Fahrt machen. Hatten sie auf ihrem Kurs halben (Abb. 2c) oder gar vorlichen Wind (Abb. 2d), mußten sie auf günstigeres Wetter warten. Durch ständige Verbesserung der Rumpfformen, der Takelung und der Segelformen ist heute jedes segelführende Fahrzeug in der Lage, schräg gegen den Wind anzusegeln und im Zickzackkurs (Kreuzen) selbst ein Ziel zu erreichen, das genau in der Richtung liegt, aus der der Wind weht.

Die Aerodynamik des Segelns ist zwar auch heute noch nicht vollständig erforscht, aber doch weitgehend in ihren Auswirkungen bekannt. Einmal wirkt ein Segel durch seine relativ große Fläche als Windfang und bringt so direkt Vortrieb, andererseits wölbt es sich unter dem Winddruck und entwickelt dabei die Eigenschaften einer Flugzeugtragfläche (vgl. S. 582) mit einem nach vorn gerichteten Sog an der Außenseite. Als dritte Kraft tritt ein Staustrahleffekt (vgl. S. 594) durch die zwischen Fock und Großsegel wie durch eine Düse strömende Luft auf. Darum haben Rennboote und schnelle Jachten weit hinter den Mast zurückreichende Vorsegel.

Die Wirkung des Windes auf ein am Wind liegendes Segelboot zeigt Abb. 3. Der Pfeil *W* stellt die konstante Windkraft, die auf das Segel drückt, nach Größe und Richtung dar. Von dieser schief auf das Segel drückenden Kraft kommt nur die zum Segel senkrechte Komponente *S* zur Wirkung. Sie sucht das Boot in die Richtung von *S* zu bewegen. Da jedoch das Boot einen sehr hohen Wasserwiderstand quer zum Kiel hat und sich fast nur in Richtung des Kiels bewegen läßt, so kommt von der Kraft *S* nur der in die Längsrichtung des Bootes fallende Anteil *V* als Vortriebskraft zur Wirkung. Das Schiff bewegt sich also mit dieser Kraft *V* in Richtung auf den Punkt *C*. Stellt man dort die Spitze des Bootes in Richtung *D* und wendet das Segel um, so daß seine Fläche wieder etwa den Winkel zwischen der Richtung, aus der der Wind bläst, und der Längsrichtung des Bootes halbiert, so wird das Boot gegen *D* getrieben. Damit kann das Boot kreuzend, aber immer durch den Wind getrieben sich der Gegend nähern, aus der der Wind weht. Der Wind, der auf das Segel wirkt, ist immer der relative Wind zum Boot. Je schneller das Boot fährt, desto stärker wird der Gegenwind. Der relative Wind ergibt sich aus der geometrischen Addition von wahrem Wind und Gegenwind, so daß der relative Wind bei größerer Fahrt immer steiler von vorn einfällt. In Abb. 3 wurde dies nicht berücksichtigt, denn das Kreuzen muß symmetrisch zur wahren Windrichtung erfolgen. Nicht berücksichtigt wurde in Abb. 3 auch die Abtrift (seitliche Versetzung), die ein öfteres Kreuzen erfordert. Die Abtrift und die Krängung (Schräglage) können durch entsprechende Kielausbildung klein gehalten werden.

Feste, in die Rumpfform einbezogene Kiele mit Bleiballast heißen Flossenkiele (Abb. 1), bewegliche Kiele der Jollen werden Schwert genannt (Abb. 5). Der Bleiballast eines Flossenkieles ist so bemessen, daß er in jedem Fall zusammen mit dem Wasserwiderstand dem Winddruck überlegen ist (Abb. 4a). Bei der Jolle hat das Schwert keinen Ballast; um das Kentern (Umschlagen) zu verhindern, müssen die Segler in weiter Auslage als lebender Ballast wirken (Abb. 4b).

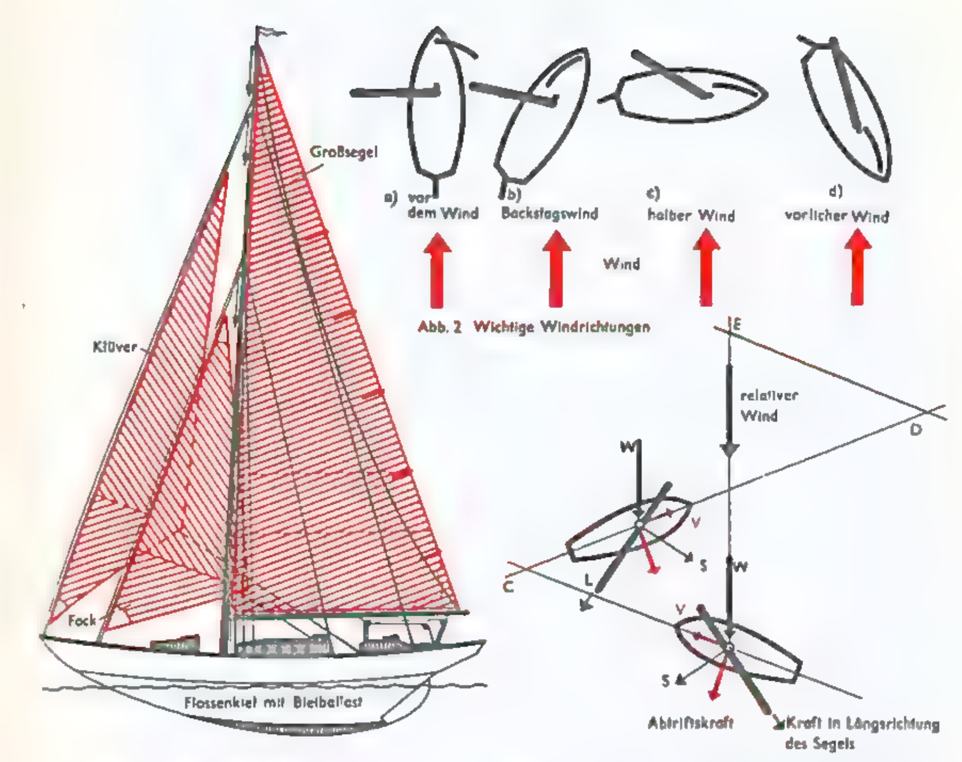


Abb. 1 Moderne Besegelung

Abb. 2 Wichtige Windrichtungen

Abb. 3 Wirkung des Windes auf ein am Winde liegendes Segelschiff

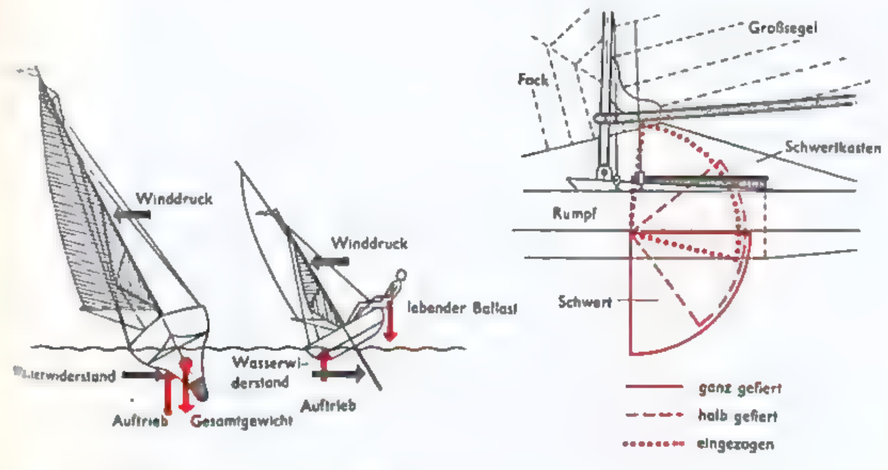


Abb. 4a Kräfte an einem Flossenkieler

Abb. 4b Kräfte an einer Jolle mit Schwert

Abb. 5 Bewegliches Schwert

WARUM EIN FLUGZEUG FLIEGT

Ein Flugzeug benötigt, um fliegen zu können, eine der Erdanziehung entgegengerichtete Kraft, da es „schwerer" als die umgebende Luft ist. Diese Kraft kommt durch den Auftrieb der Tragflächen zustande, der senkrecht zur Bewegungsrichtung steht. In der Luft entsteht wie in einer zähen Flüssigkeit infolge der Reibung noch ein in die Bewegungsrichtung fallender Widerstand (Abb. 1). Durch geeignete Formgestaltung der Tragflügelprofile (Abb. 2) erreicht man, daß der Widerstand gegenüber dem Auftrieb sehr klein bleibt und damit die aus beiden gebildete resultierende Luftkraft fast nur aus dem Auftrieb besteht.

Um die zur Entstehung des Auftriebs notwendige Luftzirkulation zu erzeugen, muß das Flügelprofil entsprechend gestaltet werden. Bei Beginn der Bewegung löst sich — wegen Verzögerung der Strömung und des damit verbundenen Druckanstiegs — die Grenzschicht an der Hinterkante vom Flügel ab und wickelt sich zum Anfahrwirbel auf. Nach dem Satz von W. Thomson muß sich zum Ausgleich um den Tragflügel eine Zirkulation von entgegengesetzt gleicher Wirbelstärke ausbilden. Nach Entfernung des Anfahrwirbels stellt sich am Tragflügel ein stationärer Zustand ein, der durch den aus einer Parallelströmung und Zirkulation entstehenden Flügelauftrieb gekennzeichnet ist.

Verwendet werden vor allem sichelförmige Profile mit verschiedener Krümmung der Ober- und Unterseite. Sie sind an der Flügelnase abgerundet und besitzen eine zugespitzte Hinterkante. Die Anstellung des Flugelprofils und die stärkere Krümmung der Profiloberseite bewirken aufgrund des längeren Weges der Luft eine höhere Geschwindigkeit auf der Oberseite als auf der Unterseite (Abb. 3). Aus der Bernoullischen Gleichung (s. S. 18) folgt, daß sich wegen der höheren Geschwindigkeit auf der Oberseite (Saugseite) ein kleinerer Druck einstellt als auf der Unterseite (Druckseite). Der Flächeninhalt dieses Druckdiagramms (Abb. 4) liefert den Auftrieb. Die Luftkräfte verändern sich mit dem Anstellwinkel (Abb. 5), sie greifen im Druckpunkt am Tragflugel an.

Die Lage des Druckpunktes verändert sich mit dem Anstellwinkel, nur symmetrische Profile und solche mit S-Schlag (erforderlich bei Nurflügelflugzeugen) sind druckpunktfest. Die Stabilität eines Flugzeuges wird maßgeblich von der Druckpunktwanderung bestimmt. Bei steigendem Anstellwinkel wandert der Druckpunkt nach vorn. Wird ein bestimmter, von der Profilform abhängiger Wert erreicht, bei dem der Auftrieb sein Maximum hat, so bricht er bei weiterer Vergrößerung des Anstellwinkels zusammen. Dabei reißt die Strömung auf der Saugseite ab (vgl. Abb. 6) und bildet ein „Totwassergebiet".

Die Profile werden so gewählt, daß sie bei Entwurfsgeschwindigkeit der vorbeiströmenden Luft einen möglichst kleinen Widerstand bieten und gleichzeitig der sog. Auftriebsbeiwert den Anforderungen entspricht. In der Abb. 7 sind die Profile eines Lastenseglers (Abb. 7a) und eines schnelleren Flugzeuges (Abb. 7b) dargestellt. Der Auftrieb des breiten, stark gewölbten Profils ist um die Hälfte größer als der des schmalen, sein Widerstand ist bei gleicher Luftgeschwindigkeit jedoch doppelt so groß. Die bekanntesten der heute verwendeten Profile stammen aus Messungen der Aerodynamischen Versuchsanstalt Göttingen und der NACA (National Advisory Committee for Aeronautics).

Auch für die *Luftschraube* (Propeller) gelten die beschriebenen Grundsätze. Die Aufgabe der Luftschraube ist die Umsetzung des Drehmomentes eines Motors in Vortrieb (axialer Schub); dieser entsteht durch die Beschleunigung von Luftmassen (Abb. 8). Der Propeller kann als ein stark verwundener Tragflügel angesehen werden. Die wirksame Anströmgeschwindigkeit resultiert jedoch aus der Fortbewegung des Flugzeuges und der Drehbewegung des Propellers. Aufgrund der zunehmenden Geschwindigkeit der erfaßten Luftmassen hinter der Propellerebene erfolgt dort eine Strahleinschnürung nach dem Kontinuitätsgesetz (s. S. 18). Bei verlustloser Strömung, d. h. bei Vernachlässigung aller Reibungswiderstände und bei unendlich langem Propellerblatt, gilt Abb. 8 für die auftretenden Kräfte und Geschwindigkeiten am Flügelblattelement.



Abb. 1 Am Tragflügel angreifende Kräfte

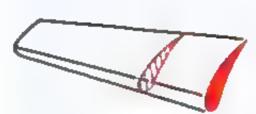


Abb. 2 Tragflügelquerschnitt

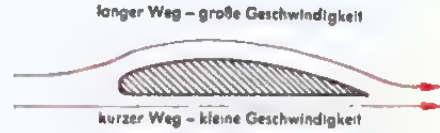


Abb. 3 Luftströmung um ein Tragflügelprofil

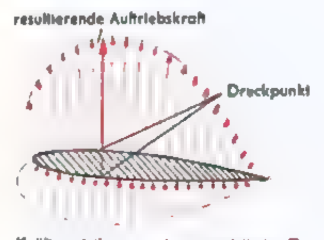


Abb. 4 Kräfteverteilung an einem umströmten Tragflügel

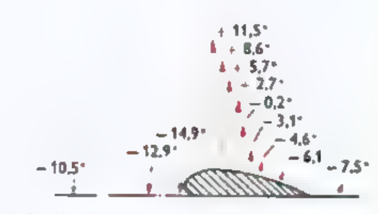


Abb. 5 Veränderung der Luftkräfte und der Lage des Druckpunktes bei verändertem Anstellwinkel

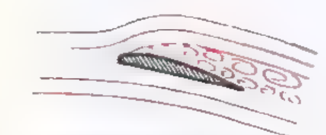


Abb. 6 Abreißen der Oberströmung bei zu großem Anstellwinkel (Wirbel!)

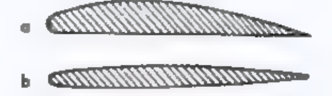


Abb. 7 Verschiedene Profile:
a Lastensegler,
b schnelleres Flugzeug

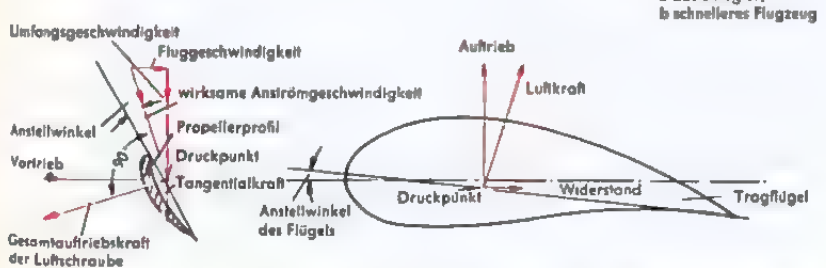


Abb. 8 Zusammenwirken der an Propeller und Tragflügel angreifenden Kräfte

TRAGFLÜGELGEOMETRIE

Der Tragflügel eines Flugzeuges ist ein Quertriebkörper, d. h., daß die durch die Luftströmung erzeugte Kraftkomponente senkrecht zur Anströmrichtung (Auftrieb) wesentlich größer ist als die Kraftkomponente in Strömungsrichtung (Widerstand). Diese Kräfte sind außer vom Quadrat der Fluggeschwindigkeit (Staudruck) v. a. von der Geometrie der Tragflügel abhängig. Sie werden sowohl von der Profilform als auch vom Grundriß des Tragflügels bestimmt.

Für den Grundriß wählt man häufig Rechteck- oder Trapezform. Die aerodynamisch günstigste Form ist allerdings die elliptische. Da der Bau dieser Form Schwierigkeiten bereitet und die verwundene Trapezform ein annähernd gleiches aerodynamisches Verhalten aufweist, wird sie kaum angewandt.

Die Tragflügel von Flugzeugen niedriger Geschwindigkeit besitzen den rechteckigen bzw. trapezförmigen Umriß bei großer Streckung. Durch die große Streckung (Abb. 1), das Verhältnis von Spannweite zu mittlerer Flügeltiefe, kann der induzierte Widerstand (dem Quadrat des Auftriebsbeiwertes proportionaler, von Flügelstreckung und Auftriebsverteilung in Spannweitenrichtung abhängiger Widerstand eines Tragflügels) klein gehalten werden. Das ist besonders bei solchen Flugzeugen wichtig, die bei relativ hohen Auftriebsbeiwerten fliegen (z. B. Segelflugzeuge).

Die Tragflügel schneller Flugzeuge (< 1 Mach) sind meist pfeil- bzw. kreisförmig ausgebildet. Die Pfeilung beeinflußt u. a. das Verhalten der wandnahen Umströmung. Hat der Flügel z. B. einen positiven Pfeilwinkel (nach hinten, Abb. 2), so löst sich die Strömung bei großen Anstellwinkeln (sog. Überzieher) zuerst am Außenflügel ab. Da in diesem Bereich die Querruder liegen, können diese frühzeitig wirkungslos werden, und das Flugzeug kippt bei der geringsten Störung ab. Beim Entwurf eines Tragflügels wird deshalb darauf geachtet, das Abreißen der Strömung zuerst am Innenflügel erfolgen zu lassen, so daß der Pilot rechtzeitig gewarnt wird und der Auftrieb nicht schlagartig zusammenbricht. Das wird dadurch erreicht, daß der Innenflügel ein anderes Profil als der Außenflügel erhält und außerdem häufig die Profile gegeneinander verschränkt werden, wobei der Anstellwinkel des Außenflügels kleiner wird als der des Innenflügels. Ist der Flügel nach vorn gepfeilt (negativer Pfeilwinkel; Abb. 3), so erfolgt das Abreißen der Strömung zuerst am Innenflügel. Das Flugzeug bleibt dabei gut steuerbar, da Außenflügel und Querruder noch einliegend umströmt werden.

Die Tragflügel von Überschallflugzeugen ($\geq$ 1 Ma) sind fast immer deltaförmig ausgebildet. Durch die große Tiefe in der Flügelmitte ergibt sich auch bei den dünnen Überschallprofilen eine ausreichende Bauhöhe, um einen verformungssteifen tragenden Verband zu gewährleisten, der genügend Volumen für Einbauten besitzt. Deltaflügel erreichen im Vergleich zu Trapez- bzw. Rechteckflügeln einen größeren Auftriebsbeiwert (von der Anströmung, v. a. aber von der geometrischen Gestalt des Quertriebkörpers und dessen Anstellwinkel abhängiger dimensionsloser Kraftbeiwert zur Berechnung des Auftriebs) erst bei sehr großen Anstellwinkeln.

Die Profilform der Tragflügel ist stromlinienförmig. Stärke und Wölbung hängen vom Verwendungszweck ab. Bei Geschwindigkeiten über 600 km/h z. B. ergibt sich durch Änderung des Strömungsverhaltens die Notwendigkeit, sehr flache und spitze Profile zu verwenden (Abb. 4 und 5). Profile an Überschallflugzeugen besitzen annähernd Geschoßform (Abb. 6).

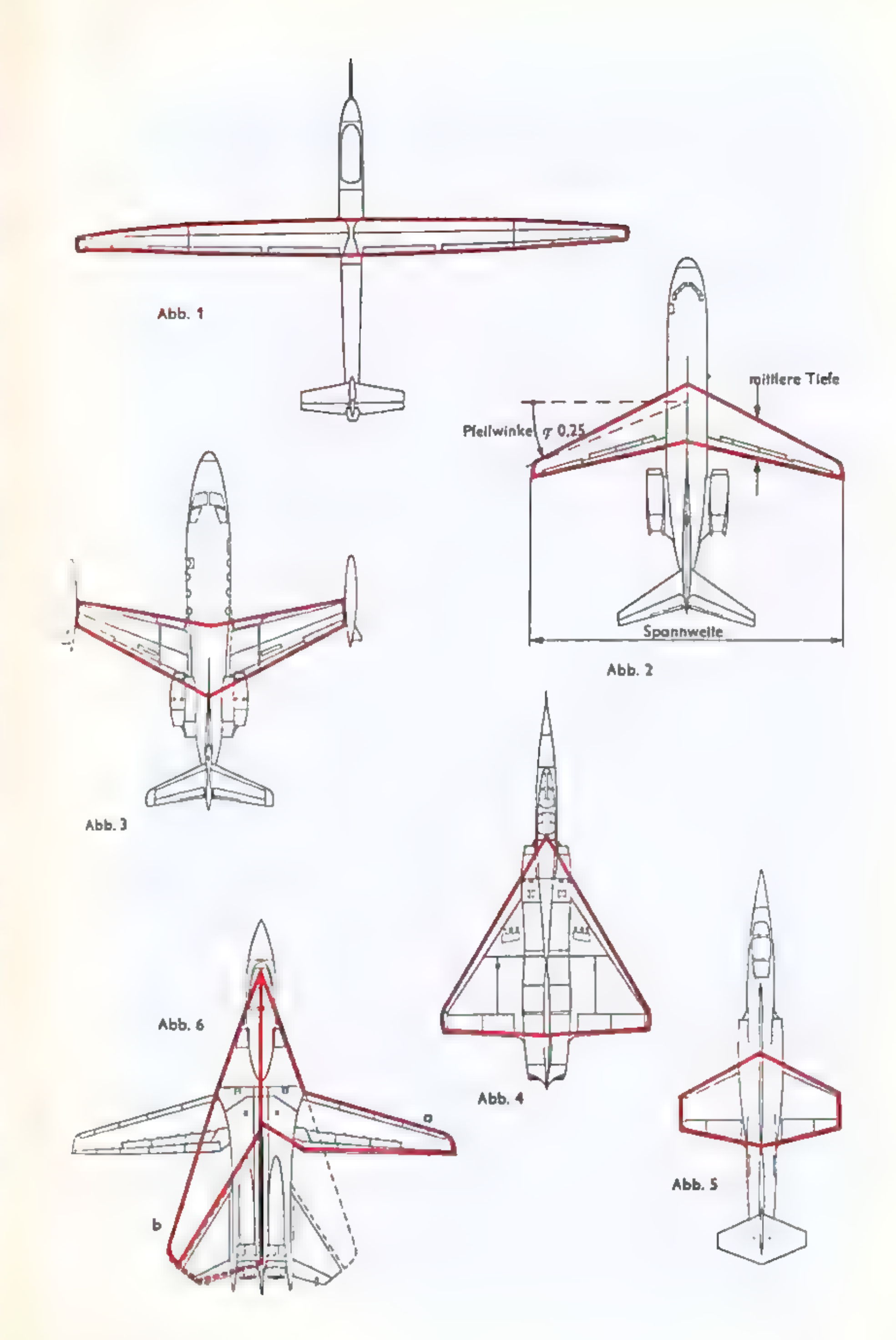


Abb. 1

Abb. 2

Abb. 3

Abb. 4

Abb. 5

Abb. 6

BEEINFLUSSUNG DER STRÖMUNG AN FLUGZEUGEN I

Das Verhalten der Strömung wird von der Form des angeströmten Körpers und den Vorgängen in der Grenzschicht bestimmt. Diese bildet sich zwischen der Außenhaut des Flugzeuges und der vorbeifließenden Luft als eine durch Reibung entstandene dünne Übergangsschicht, in der die Geschwindigkeit von Null unmittelbar an der Oberfläche bis auf den von der Form bestimmten Wert der Außenströmung ansteigt.

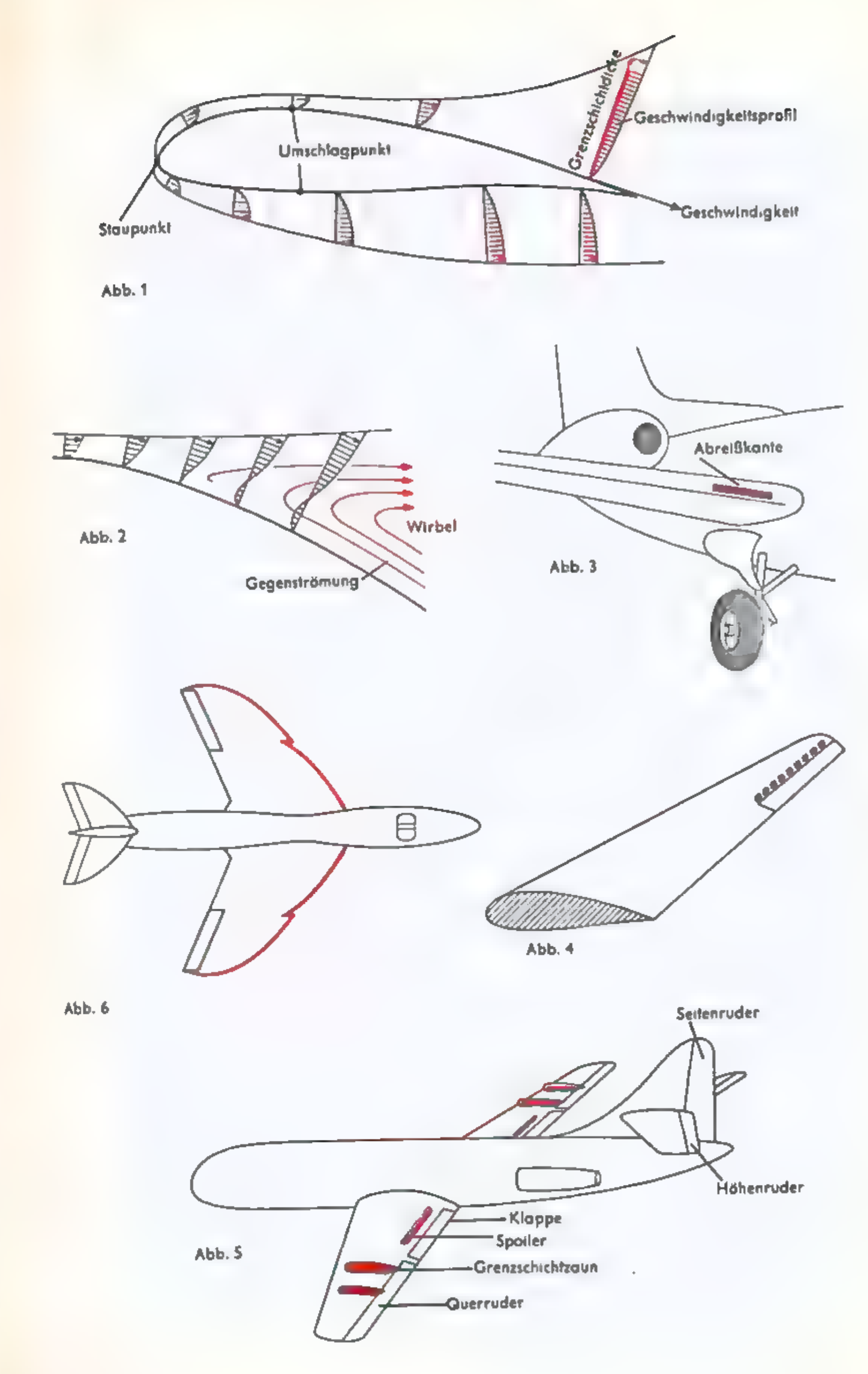
Die Strömungsart in der *Grenzschicht* (Abb. 1, nicht maßstäblich) kann *laminar* oder *turbulent* sein. Das Geschwindigkeitsprofil der laminaren Grenzschicht zeigt einen stetigen Verlauf, während bei der turbulenten Grenzschicht der Geschwindigkeitszuwachs nur im Mittel stetig ist und bei genauer Betrachtung Größenschwankungen auftreten. Im Bereich der *Abreißzone* tritt sogar eine Strömung entgegen der Flugrichtung auf (Abb. 2). Die Umströmung des Tragflügels nimmt ihren Anfang im vorderen Staupunkt. Die zunächst laminare Grenzschichtströmung erreicht mit dicker werdender Grenzschicht den Umschlagpunkt, an dem die Strömung in die turbulente Form umkippt. Der Umschlagpunkt liegt in der Nähe des Druckminimums, das etwa an der Stelle der größten Flügeldicke herrscht. Die turbulente Grenzschicht löst sich im Normalfall unter Wirbelbildung von der Hinterkante des Tragflügels; sie reißt ab. Bei ungünstigem Führen der Strömung kann verfrühtes, laminares Abreißen eintreten, das einen starken Auftriebsabfall bei gleichzeitiger Widerstandserhöhung auslöst. Da die turbulente Grenzschicht besser an der Oberfläche haftet, weil sie Energie von der Außenströmung aufnehmen kann, wird in solchen Fällen das Umschlagen der Grenzschicht durch konstruktive Maßnahmen erzwungen und somit der Abreißvorgang verhindert.

Die Abreißkante (Abb. 3) dient vor allem bei Sportflugzeugen als Vorwarnung für den überzogenen Flugzustand. Sie besteht nur aus einem kurzen dreikantigen Blech oder einem Drahtstück, das auf der Flügelnase befestigt wird. Beim Vergrößern des Anstellwinkels setzt der Abreißvorgang zunächst in der Breite der Abreißkante ein, die Strömung löst sich bereits an der Flügelnase von der Tragfläche. Die plötzliche Auftriebsverringerung wird vom Flugzeugführer deutlich wahrgenommen. Das auftretende kopflastige Luftkraftmoment unterstützt die Rückkehr des Flugzeugs auf kleinere Anstellwinkel.

Turbulenzgeneratoren (Abb. 4) werden als Störquellen an Stellen laminaren Abreißens vorgesehen, um das Umschlagen in die turbulente Strömung zu bewirken und damit das Abreißen zu verhindern. Verwendung finden quer zur Anströmrichtung stehende Blechstücke. Auch der bei Flugmodellen anzutreffende Stolperdraht zählt dazu.

Grenzschichtzäune (Abb. 5) werden an gepfeilten Tragflächen eingesetzt, um das Abfließen der Strömung vom Innen- zum Außenflügel zu verhindern. Dieser Vorgang wird nämlich durch die Pfeilung begünstigt. Die Grenzschicht nimmt wegen der großen Lauflänge an Dicke zu und neigt zum Abreißen. Gleiche Wirkung erzielt man durch eine unterbrochene Flügelnase, die wie ein Sägezahn aussieht (Abb. 6).

Verdrängungskörper, auch Interferenztropfen genannt, verkleiden die Nahtstelle des T-Leitwerks (Abb. 7), um den von der Interferenz der Grenzschichten des Höhen- und Seitenleitwerks verursachten Widerstand zu senken. Im Gegensatz zu den starren Hilfsmitteln (Abb. 3–6), beeinflussen auch bewegliche und dynamische Hilfsmittel die Strömung. Sie sind im folgenden behandelt. Die Ruder und Trimmruder gestatten das Steuern des Flugzeuges um die drei Achsen: Hochachse (Seitenruder), Langsachse (Querruder) und Querachse (Höhenruder). Die Ruder sind in der Regel gelenkig mit einem starren Teil, der Flosse oder der Tragfläche, verbunden. Durch Ausschlagen des Ruders verändert sich die Wölbung des aus Flosse und Ruder gebildeten aerodynamischen Profils.



BEEINFLUSSUNG DER STRÖMUNG AN FLUGZEUGEN II

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Rudern, die auch als gedämpft bezeichnet werden, wird das Hohen- und Seitenleitwerk vereinzelt auch ungedämpft ausgeführt. Dabei ist die Trennung in Flosse und Ruder aufgehoben, ein starres Profil wird um eine Achse gedreht. Die Ruderwirkung entsteht durch Veränderung des Anstellwinkels. Die Querruder in den beiden Tragflächen werden gegensinnig ausgeschlagen. Dadurch erfährt die Tragfläche mit nach unten ausgeschlagenem Querruder eine Auftriebserhöhung und die andere mit nach oben ausgelenktem Ruder eine Auftriebsverringerung. Das entstehende Moment dreht das Flugzeug um die Längsachse. Die Trimmruder sind kleine verstellbare Flächen an den Ruderhinterkanten. Der Pilot kann mit ihrer Hilfe während des Fluges das Flugzeug für einen beliebigen Flugzustand so austrimmen, daß keine Ruderkräfte auftreten (Abb. 7).

Die Klappen dienen der Steuerung des Gleitwinkels, sie beeinflussen in ausgefahrenem Zustand Auftrieb und Widerstand.

Beim Ausfahren der Nasenklappe, die auch Vorflügel genannt wird (Abb. 8), bildet sich zwischen dieser und dem Tragflügel ein Schlitz, durch den die Luft wegen des Druckunterschiedes von der Druckseite zur Saugseite strömt und dort der Grenzschicht neue Energie zuführt. Das Ablösen der Grenzschicht wird dadurch zu größeren Anstellwinkeln hinausgeschoben. Die einfache Klappe (Wölbungsklappe) vergrößert die Wölbung der Tragfläche und damit den Auftrieb (Abb. 9). Das Abreißen setzt erst bei größeren Anstellwinkeln ein, und die Mindestfluggeschwindigkeit nimmt einen geringeren Wert an, was bei Start und Landung vor allem schneller Flugzeuge von Bedeutung ist. Wegen des mit der Fluggeschwindigkeit stark zunehmenden Widerstandes werden die Klappen nur im Langsamflug ausgefahren. Sollen die Klappen wieder eingefahren werden, so muß zuerst die Geschwindigkeit auf den Mindestwert des Profils ohne Klappenausschlag erhöht werden, um das Abreißen zu vermeiden. Die Spaltklappe (Abb. 8) ist eine verbesserte Wölbungsklappe, bei der wie beim Vorflügel die Luft durch einen Spalt von der Druck- zur Saugseite strömt und eine weitere Steigerung der Auftriebsbeiwerte ohne Ablösen der Grenzschicht gestattet.

Die Spreizklappe (Abb. 10) senkt im Gegensatz zu den anderen Klappenkonstruktionen den Druck auf der Saugseite. Da die Grenzschicht auf der Saugseite geringere Widerstände zu überwinden hat, werden auch mit der Spreizklappe höhere Auftriebsbeiwerte erzielt.

Bremsklappen (Abb. 9) sind Widerstandsflächen, die in den Tragflächen und bei einigen Flugzeugmustern auch im Rumpfheck angeordnet sind und bei der Landung ausgefahren werden. Sie erzeugen schädlichen Widerstand und vernichten an der Tragfläche einen Teil des Auftriebs, da die Grenzschicht in Klappenbreite abreißt. Unter Spoilern versteht man nur einseitig auf der Saugseite eingebaute Bremsklappen.

Zu den dynamischen Hilfsmitteln gehört die Strahlklappe, wie man einen Luftstrahl bezeichnet, der im Bereich der Hinterkante des Tragflügels unter einem Winkel nach unten ausgeblasen wird. Außer der Klappenwirkung erzielt man durch die Energie des Luftstrahls einen höheren Gesamtschub.

Die Grenzschicht läßt sich außerdem durch Absaugen oder Ausblasen von Luft steuern. Das Absaugen über eine Vielzahl kleiner Bohrungen ermöglicht das Laminarhalten. Die Technik des Absaugens ist noch im Versuchsstadium.

Das Ausblasen kann nicht zum Laminarhalten eingesetzt werden, weil die Grenzschicht dabei gestört wird. Dieses Verfahren wird aber mit großem Erfolg bei Rudern und Klappen angewandt, vor denen ein schmaler Strahl hoher Geschwindigkeit ausgeblasen wird, der das Abreißen der turbulenten Grenzschicht verhindert (Abb. 11 und 12).

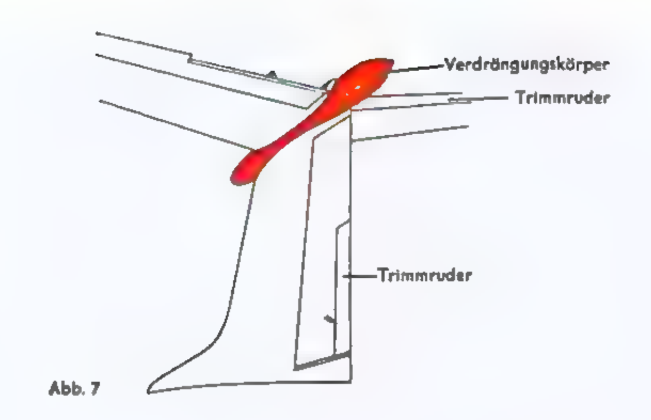


Abb. 7

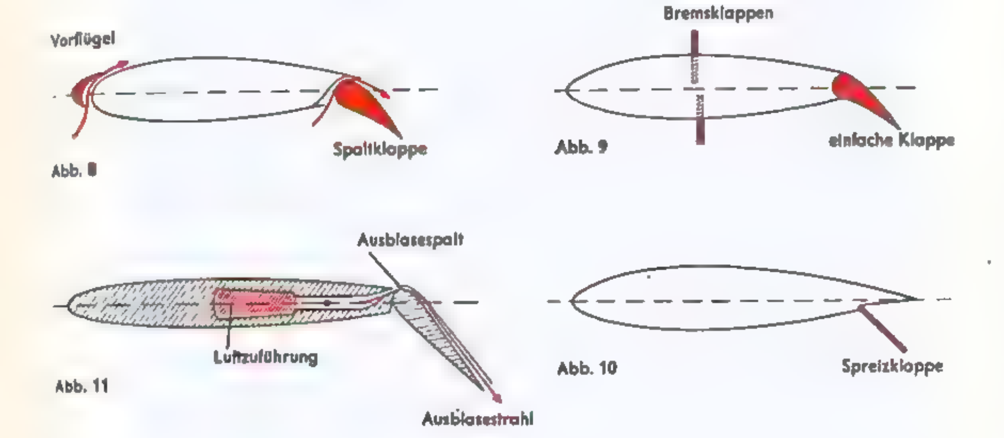


Abb. 8

Abb. 9

Abb. 11

Abb. 10

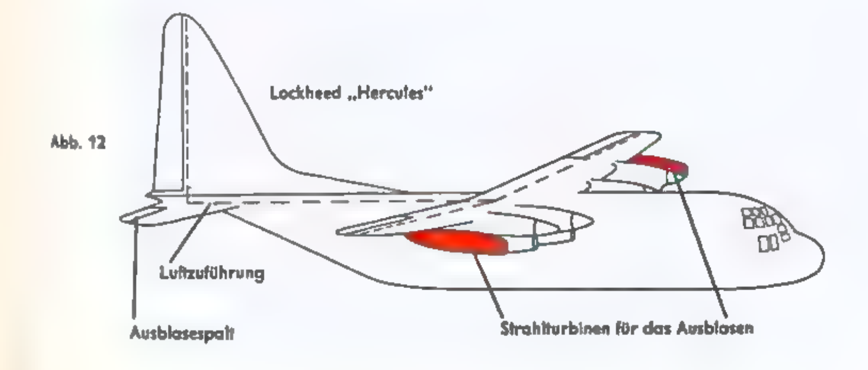


Abb. 12

ÜBERSCHALLFLUG

Da die Schallgeschwindigkeit u. a. vom Luftdruck (Luftdichte) abhängt, ist auch die Grenze zum Überschallflug verschieden. So beginnt der Überschallflug z. B. bei einer Lufttemperatur von —40° C schon bei einer Geschwindigkeit relativ zur Luft von etwa 1102 km/h, während bei +20° C etwa 1238 km/h notwendig sind. Deshalb bezieht man die Fluggeschwindigkeit auf die jeweilige Schallgeschwindigkeit und gibt sie in Mach-Zahlen an. Im Gegensatz zum Unterschallflug ist der Luftwiderstand beim Überschallflug sehr viel größer, da die Luft dem Flugkörper nicht mehr ausweicht, sondern von ihm komprimiert und zerschnitten wird (Abb. 1). Es gelten nicht mehr die Gesetze der Aerodynamik, sondern die der Gasdynamik. Die Flugeigenschaften ändern sich erheblich, es tritt eine starke Reibungswärme auf, so daß Überschallflugzeuge aus besonders warmfestem Material (bei Fluggeschwindigkeiten über Mach 2,5 Titan- oder Stahllegierungen) bestehen und für die Piloten spezielle Kühlanlagen eingebaut werden müssen.

Im Überschallbereich fliegende Flugzeuge werden zur Widerstandsverringerung nach der Flächenregel (Gesetz der Strömungslehre, wonach der Widerstand eines Flugkörpers im Überschallbereich von dessen Querschnittsverteilung abhängig ist) ausgeführt. Diese sieht das Einschnüren des Rumpfes im Flügelbereich vor (Wespentaille; Abb. 2). Die Einschnürung wird so gewählt, daß der Flugzeugquerschnitt entlang der Längsachse annähernd konstant verläuft.

Die über die Tragfläche strömende Luft erfährt zunächst eine Beschleunigung und anschließend eine Verzögerung. Dicht unterhalb der Schallgeschwindigkeit kommt es an der Tragfläche örtlich zu Überschallgeschwindigkeiten, die bei der nachfolgenden Verzögerung auf Unterschallgeschwindigkeit einen Verdichtungsstoß und, dadurch bedingt, einen starken Druckanstieg bewirken, der mit beträchtlichem Energieverlust verbunden ist. Der Verdichtungsstoß tritt zuerst an der Flügelvorderkante auf und wandert mit zunehmender Machzahl nach hinten.

Die häufige Unwirksamkeit der an den Leitwerksflächen beweglich angebrachten Ruder beim Überschallflug wird dadurch behoben, daß man die gesamte Leitwerksfläche aus einem Stück herstellt und als ganzes verstellbar anordnet.

Die von der Spitze des Flugkörpers ausgehenden Schallwellen bilden eine Wellenfront in Form eines Kegels (Machscher Kegel, Kopfwelle s. Abb. 2 und 4), für dessen halben Öffnungswinkel φ gilt:

$\sin\varphi = c_s/v$ (c_s Schallgeschwindigkeit, v Geschwindigkeit des Flugkörpers). Die Kopfwelle zieht sich als Lärmteppich über das überflogene Gebiet.

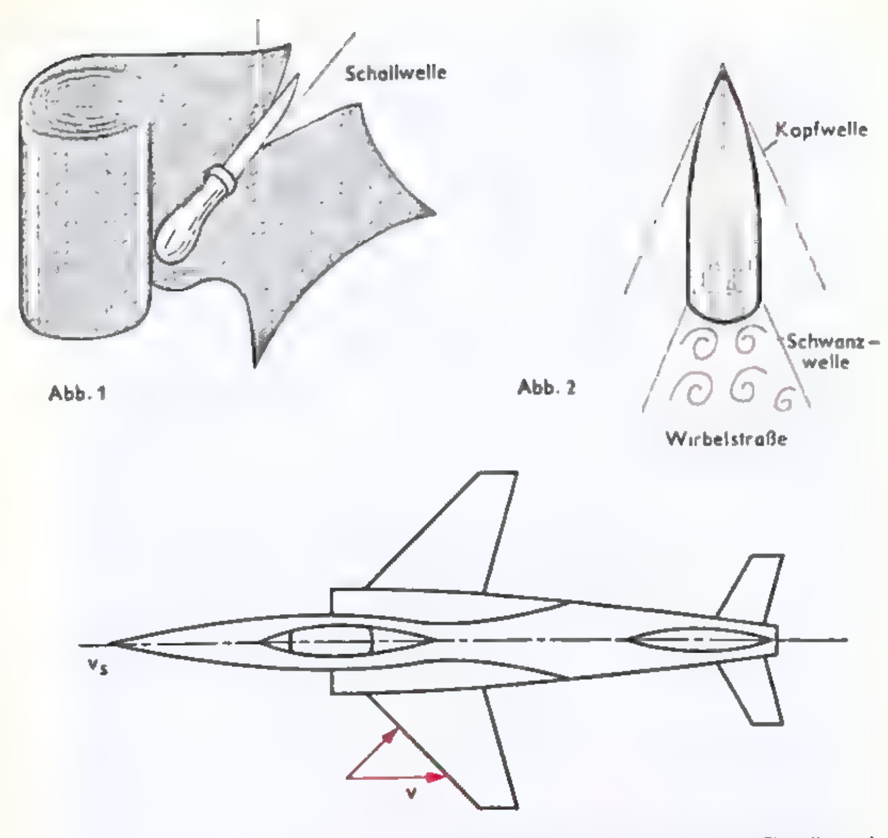


Abb. 3 Einschnürung des Rumpfes im Flügelbereich

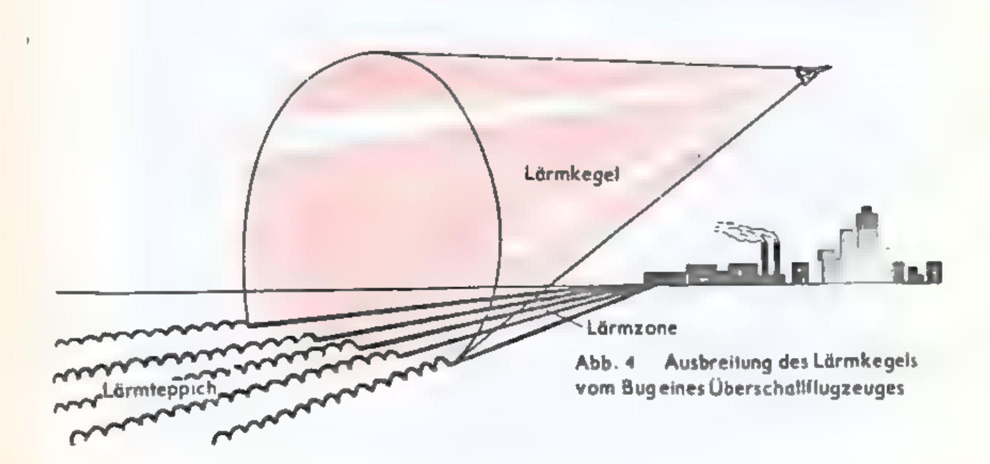


Abb. 4 Ausbreitung des Lärmkegels vom Bug eines Überschallflugzeuges

SEGELFLUGZEUG

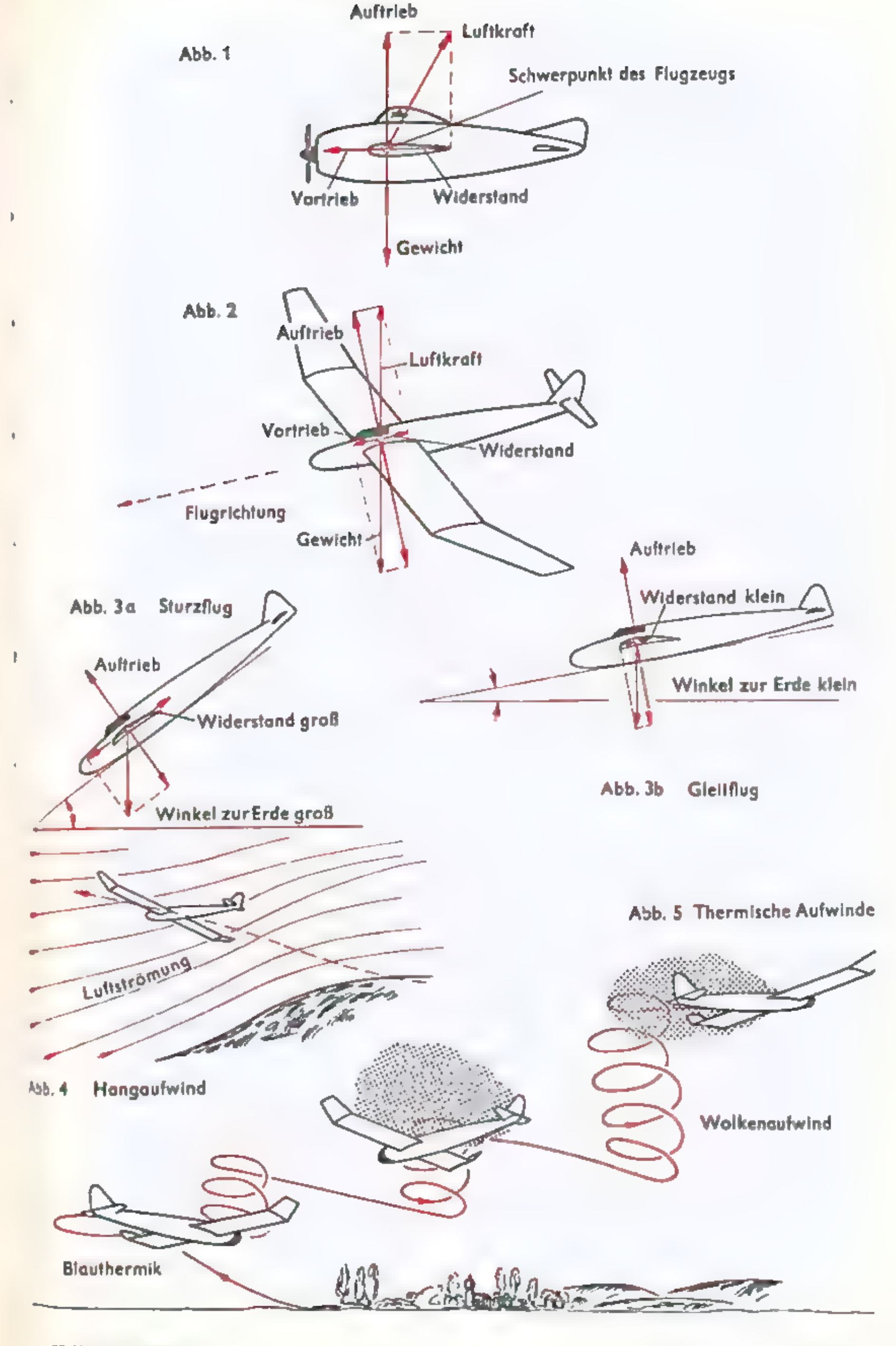
Zur Erfüllung des Kräftegleichgewichts für den Horizontalflug eines Flugzeuges muß das Flugzeuggewicht durch den Auftrieb (vgl. S. 558) und der Widerstand durch eine Schubkraft in Flugrichtung ausgeglichen werden. Beim Motorflugzeug (Abb. 1) wird die Schubkraft durch den Motor erzeugt (vgl. S. 582). Ein Segelflugzeug hat keinen Motor, es kann somit in völlig ruhiger Luft keinen Horizontalflug (Flug in konstanter Höhe) durchführen. Mit einem Segelflugzeug ist dann ein stationärer Flug nur auf einer zur Erde geneigten Bahn möglich. In diesem Fall ist das Kräftegleichgewicht dadurch erfüllt, daß die Komponente des Flugzeuggewichtes senkrecht zur Flugbahn gleich dem Auftrieb und die Komponente des Flugzeuggewichtes in Flugrichtung gleich dem Widerstand ist. Mit anderen Worten: Die resultierende Luftkraft aus Auftrieb und Widerstand muß beim Segelflug gleich dem Flugzeuggewicht sein (Abb. 2). Der Bahnneigungsflug (Abb. 3a und 3b) des Segelflugzeuges ist abhängig von dem Verhältnis des Widerstandes zum Auftrieb (Gleitwinkel). Je größer der Widerstand ist, desto steiler ist die Flugbahn. Die Flugleistung eines Segelflugzeuges ist also um so besser, je kleiner der Widerstand bei gegebenem Auftrieb ist.

Der Gleitwinkel bestimmt die Dauer des Gleitfluges von der Ausklinkhöhe (nach dem Anschleppen) bis zur Erdoberfläche. Da die Fortbewegung mit Höhenverlust verbunden ist, bedeutet jede Landung eines Segelflugzeuges eigentlich eine Notlandung.

Der Reiz des Segelfluges ergibt sich aus der Aufgabe, durch Aufsuchen nach oben gerichteter Luftströmungen die an sich begrenzte Flugdauer zu verlängern und in größere Höhen aufzusteigen. Dazu gehören gründliche Kenntnisse der Meteorologie und viel Erfahrung; z. B. sind ohne Flügelschlag kreisende Vögel ein untrügliches Zeichen für einen „Bart", wie eine Aufwindzone in der Fachsprache heißt.

Ein Segelflugzeug kann dann steigen, wenn die Geschwindigkeit der aufsteigenden Luftmassen die Sinkgeschwindigkeit übertrifft. Die Steig- oder Sinkgeschwindigkeit eines Flugzeuges wird am Variometer (vgl. S. 602) abgelesen.

Aufwinde entstehen an horizontal angeströmten Berghängen (Hangaufwind; Abb. 4), über stark erwärmter Erdoberfläche und unter sich bildenden Kumuluswolken (thermische Aufwinde; Abb. 5). Ferner bilden sich bei Gewitterfronten die Frontaufwinde, da die Kaltluft der Front die über der Erde lagernde Warmluft nach oben drängt.



STRAHLTRIEBWERKE I

Die in der Luftfahrt verwendeten Strahltriebwerke sind Gasturbinen-, Staustrahl- und Raketentriebwerke.

Die Vortriebswirkung dieser Triebwerke (mit Ausnahme der Raketen) beruht grundsätzlich auf einer Impulsänderung der durchgesetzten Luft, die verdichtet und durch Verbrennung von eingespritztem Kraftstoff erhitzt wird. In der Schubdüse werden die Verbrennungsgase beim Ausströmen nahezu auf den Außendruck entspannt und auf eine Geschwindigkeit beschleunigt, die die der eintretenden Luft wesentlich übersteigt. Der Geschwindigkeitszuwachs ergibt die Impulsänderung und damit den Schub des Triebwerks, da dieser der zeitlichen Änderung des Impulses der ausgestoßenen Masse nach dem 3. Newtonschen Grundgesetz der Mechanik entgegengesetzt gleich ist. Dieses Wechselwirkungsgesetz besagt, daß Wirkung gleich Gegenwirkung oder Aktion gleich Reaktion ist. Die Druckenergie in der Brennkammer wird also in Impuls umgewandelt, der nach dem Impulssatz dem Produkt aus Masse × Geschwindigkeit entspricht. Der Gasstrahl stößt sich also zur Vortriebserzeugung nicht von der Umgebungsluft ab.

Das Gesetz von Newton veranschaulicht Abb. 1: Das Wasser wird durch den in der Wasserleitung herrschenden Druck nach außen gepreßt, der Impuls des ausströmenden Wassers liefert die Aktionskraft. In Übereinstimmung mit dem Wechselwirkungsgesetz tritt gleichzeitig als Reaktion eine gleich große, entgegengesetzt gerichtete Kraft auf, die ein Drehmoment auf das drehbar gelagerte Gestänge ausübt und dieses in Drehung versetzt.

Das am Rasensprenger erläuterte Prinzip läßt sich auch auf das Flugzeug anwenden, bei dem entweder durch die Luftschraube eine große Luftmasse auf eine kleine Geschwindigkeit beschleunigt wird oder ein Strahltriebwerk kleine Luftmassen auf sehr hohe Geschwindigkeit beschleunigt (Abb. 2).

Eine weiteres Beispiel für den Impulssatz und das Prinzip von Newton bietet ein geschlossener Behälter (Abb. 3 a), in dem z. B. durch Verbrennung von Treibstoff Wärme und damit Druck erzeugt wird. Öffnet man diesen Behälter auf einer Seite, so treten die Gase mit hoher Geschwindigkeit aus und erteilen dem Behälter eine Schubkraft in entgegengesetzter Richtung (Abb. 3 b).

Die Leistung eines Triebwerks ist proportional der Dichte der angesaugten Luft und nimmt daher mit der Höhe ab. Da der Widerstand des Flugzeugs in gleichem Maße abnimmt und die kältere Ansaugluft einer größeren Wärmezufuhr gleichkommt, nimmt die Flugzeuggeschwindigkeit in größeren Höhen etwas zu.

Das Staustrahltriebwerk ist das einfachste Strahltriebwerk, da keine umlaufenden Teile vorhanden sind. Es baut sich nur aus dem Einlaufdiffusor, dem Einspritzsystem, der Brennkammer und der Schubdüse auf.

Strömt Luft in ein Rohr ein, dessen Querschnitt sich in Strömungsrichtung zunächst erweitert (Abb. 4 a), so bewirkt die Verzögerung eine Drucksteigerung (s. S. 18). Der nach hinten kleiner werdende Querschnitt kehrt die Verhältnisse wieder um. Es entsteht kein Schub, vielmehr tritt durch die Reibungsverluste eine Widerstandskraft auf. Spritzt man jedoch in die verzögerte Strömung Treibstoff ein und verbrennt diesen (Abb. 4 b), so nimmt das Volumen und damit die Austrittsgeschwindigkeit der Gase zu — es entsteht ein Vortrieb.

Im Stand gibt das Staustrahltriebwerk keinen Schub, da nur die kinetische Energie der anströmenden Luft die notwendige Druckerhöhung in der Brennkammer durch Verzögerung bewirken kann.

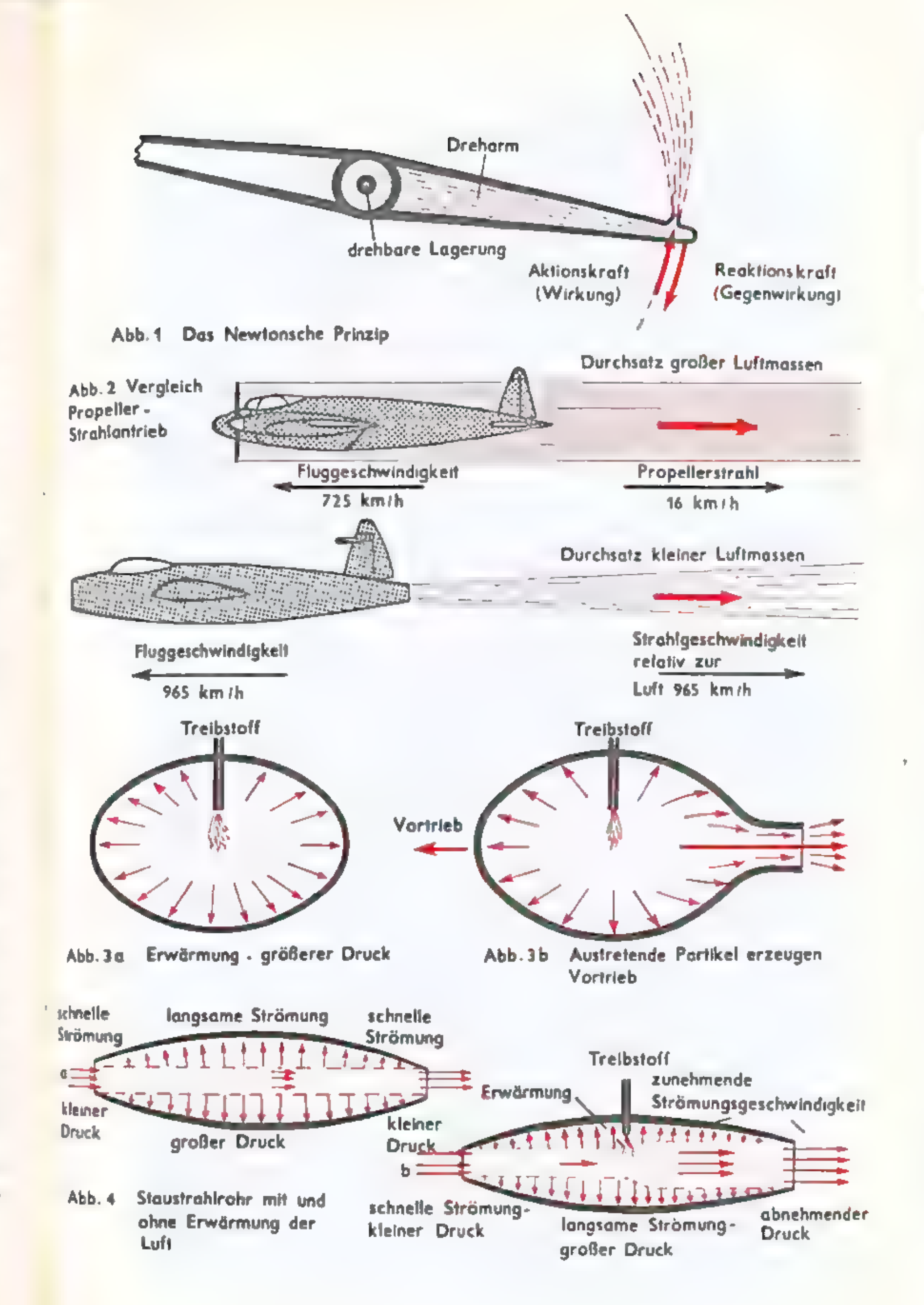


Abb. 1 Das Newtonsche Prinzip

Abb. 3a Erwärmung - größerer Druck

Abb. 3b Austretende Partikel erzeugen Vortrieb

Abb. 4 Staustrahlrohr mit und ohne Erwärmung der Luft

STRAHLTRIEBWERKE II

Turbinen-Luftstrahltriebwerke (TL-Triebwerke) verfügen zusätzlich über einen eigenen, von einer Turbine angetriebenen Verdichter und umgehen damit die Nachteile des Staustrahlantriebs (Abb. 1). Durch den Einlaufdiffusor saugt ein mehrstufiger Axialverdichter Außenluft an und verdichtet sie. In die Brennkammer wird Kraftstoff eingespritzt und verbrannt. Die durch die Temperatursteigerung bedingte Volumenzunahme der Gase bewirkt ein schnelles Ausströmen durch Turbine und Schubdüse. An die Turbine geben die Verbrennungsgase nur so viel Energie ab, wie zum Antrieb des Verdichters und der Zusatzaggregate erforderlich ist. Der verbleibende, größere Teil der Energie liefert den Schub (nach dem schon beschriebenen Impulssatz und dem 3. Grundgesetz von Newton; s. S.594). Der Regulierkörper in der Düse bestimmt die Austrittsgeschwindigkeit des Gasstromes und damit die Größe des Schubes durch Veränderung des Querschnittes der Austrittsöffnung: ein kleiner Querschnitt entspricht einer großen Gasaustrittsgeschwindigkeit (bei jeweils gleichbleibenden Gasmengen).

Eine einfache Möglichkeit der Leistungssteigerung bietet sich bei den TL-Triebwerken durch die Nachverbrennung an, indem man in die aus der Turbine kommenden Gase vor ihrer Beschleunigung in der Düse nochmals Kraftstoff einspritzt. Der schlechte Wirkungsgrad dieses Verfahrens erlaubt nur kurzzeitige Anwendung.

Kleine TL-Triebwerke verwenden einen Radialkompressor, der einfacher und kürzer gebaut ist. Es gibt auch Triebwerke mit Kombinationen von Axial- und Radialstufen.

Für besonders wirtschaftlichen Betrieb im mittleren Unterschallbereich werden Propeller-Turbinen-Luftstrahltriebwerke (PTL) gefertigt, deren Propeller über ein Untersetzungsgetriebe von der Turbinenwelle angetrieben wird (Abb. 2 und 3). Sie zählen zu den kompliziertesten Kraftmaschinen überhaupt. Bei diesen PTL-Triebwerken werden die Gase in der Turbine weitgehend entspannt, da sowohl Verdichter als auch Luftschraube angetrieben werden müssen. Die ausströmenden Gase ergeben jedoch noch einen Restschub.

Neben den dargestellten PTL-Triebwerken gibt es auch Ausführungen mit zwei konzentrischen Wellen, die mit verschiedenen Drehzahlen laufen. Auf beiden Wellen sitzt ein Turbinensatz; eine Welle treibt den Verdichter an, die andere die Luftschraube. Das Zweikreistriebwerk eignet sich besonders für Geschwindigkeitsbereiche, die für den Propeller zu hoch und für das einfache TL-Triebwerk zu niedrig sind. In der mit verlängerten Schaufeln ausgerüsteten Niederdruckkompressorstufe wird ein Teil der vorverdichteten Luft abgezweigt und über eine Umführung (by-pass) in die Schubdüse gedrückt (Abb. 4). Wegen des erhöhten Energiebedarfs der Turbine vermindert sich die Austrittsgeschwindigkeit der Gase, was einer Erhöhung des Vortriebswirkungsgrades gleichkommt. Die bei den PTL-Triebwerken erwähnte Bauweise mit zwei Wellen wird hier ebenfalls angewandt. Die Niederdruckstufe wird von der zweiten Turbinenstufe (in der Abbildung schwarz) und die Hochdruckstufe von der ersten Turbinenstufe (gerastert) angetrieben. Das By-Pass-Verhältnis (Kalt-Warm-Strom) liegt zwischen 0,7 und 2. Zu den Zweikreistriebwerken zählen auch die Mantelstromtriebwerke (aft fan), bei denen die Turbinenschaufeln zum Zwecke zusätzlicher Kaltluftansaugung verlängert wurden. Dies ist konstruktiv einfacher, da vorhandene Triebwerke durch Auswechseln der Turbinenstufen umgebaut werden können.

Strahltriebwerke verfügen meist über eine Einrichtung zur Schubumkehr, um mit kurzen Landebahnen auszukommen. Vor allem werden der Aufprallumlenker und das Schaufelgitter mit Absperrkörpern verwendet.

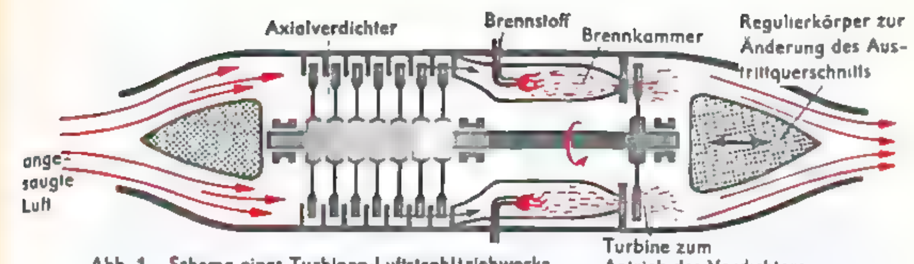


Abb. 1 Schema eines Turbinen-Luftstrahltriebwerks

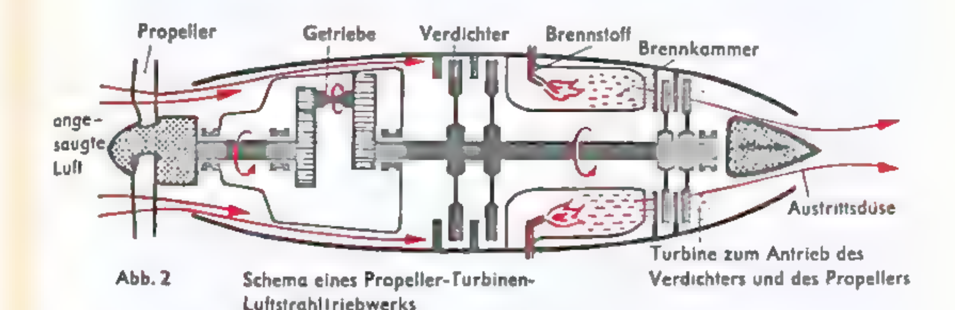


Abb. 2 Schema eines Propeller-Turbinen-Luftstrahltriebwerks

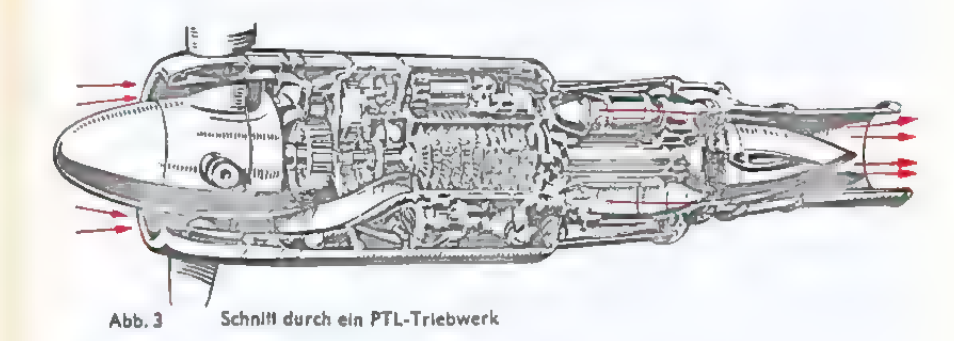


Abb. 3 Schnitt durch ein PTL-Triebwerk

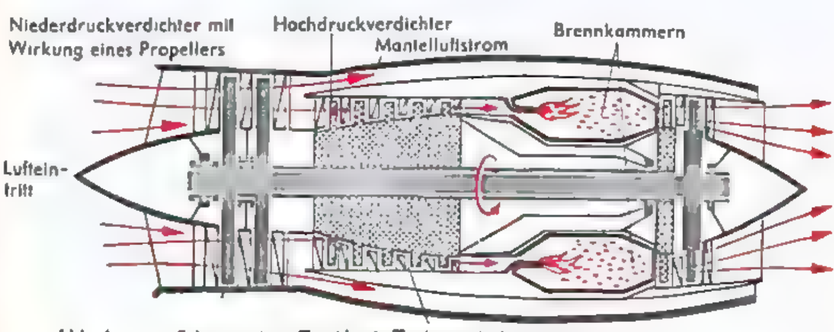


Abb. 4 Schema eines Zweikreis-Turbinen-Luftstrahltriebwerks

HYDRAULISCHE BORDSYSTEME I

Die Betätigung von Klappen, Rudern und Einziehfahrwerk erfolgt bei den meisten Flugzeugen durch hydraulische Kraftübertragung. Die Hydraulik verdankt ihre weite Verbreitung im Flugzeugbau der Möglichkeit, große Kräfte bei geringem Raumbedarf zu übertragen und auszuüben. Als Übertragungsmedium dient unter hohem Druck stehendes Hydrauliköl, das gleichzeitig zur Schmierung der beweglichen Teile dient.

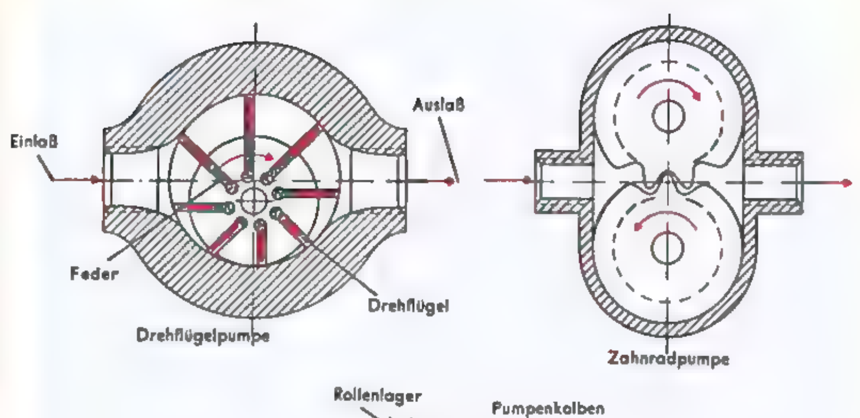
Bauelemente der Hydraulik: Die *Pumpen* baut man als Kreiselpumpen oder Verdrängerpumpen; erstere eignen sich nur für geringe Drücke, sie finden Verwendung als Kraftstoffpumpen. Die nach dem Verdrängungsprinzip arbeitenden Pumpen erzeugen einen stoßweisen Ölstrom. Ihre Förderleistung wird von Schwankungen des Drucks kaum beeinträchtigt. Die wichtigsten Bauarten sind Drehflügel-, Zahnrad- und Kolbenpumpen (Abb. 1). Die Kolbenpumpe herrscht im Flugzeugbau vor, da sie die höchsten Drücke ermöglicht. Während moderne Zahnradpumpen bis 175 kp/cm^2 Druck erzeugen, erreichen serienmäßige Kolbenpumpen bis zu 350 kp/cm^2.

Die Kolbenpumpe wird als Axial- oder Radialkolbenpumpe gebaut. Zum Erzielen einer ausgeglichenen Förderung werden stets mehrere Kolben vorgesehen. Bei der Axialpumpe werden diese über eine Taumelscheibe angetrieben. Die Fördermenge kann durch Ändern der Neigung der Taumelscheibe geregelt werden. *Hydromotoren* in Form von Zahnrad-, Flügel- und Kolbenmotoren wandeln die Druckenergie des Hydrauliköls wieder in mechanische Energie um; an der Motorwelle kann ein Drehmoment abgenommen werden. Die Hydromotoren sind in ihrem Aufbau den Hydropumpen ähnlich. *Hydraulikzylinder* setzen die Energie in eine hin- und hergehende Bewegung um. Sie bestehen im wesentlichen aus einem Zylinder, in dem ein Kolben, durch Drucköl beaufschlagt, eine Bewegung ausführt, die durch eine Kolbenstange übertragen wird (Abb. 2). Die *Ventile* dienen zum Steuern der Strömungsrichtung, zum Regeln des Druckes und der Strömungsmenge.

Das Druckbegrenzungsventil öffnet nach Übersteigen eines eingestellten Druckes die Rücklaufleitung zum Tank solange, bis der Druck wieder unter den eingestellten Wert abgesunken ist. Druckminderventile reduzieren den Öldruck des Systems auf den in einem zweiten System benötigten geringeren Druck. Die Hauptbauarten der Wegeventile sind Längs- und Drehschieber. Je nach Schieberstellung werden mehrere Ventilöffnungen geöffnet oder gesperrt (Abb. 3). Die Wegeventile werden von Hand, mechanisch, hydraulisch oder elektrisch durch Magnete betätigt. Rückschlagventile (Abb. 4) sperren den Ölstrom in einer Richtung, der Durchfluß in Gegenrichtung ist ungehindert. Drosselventile dienen zum Einstellen eines bestimmten Ölstroms; dieser ist jedoch druckabhängig. Stromregelventile halten den Ölstand unabhängig vom Druck konstant. Sie bestehen aus einer einstellbaren Drossel und einem vor- oder nachgeschalteten Differenzdruckkolben. *Hydrospeicher* werden eingesetzt, wenn kurzzeitig ein die Förderleistung der Pumpe übersteigender Ölbedarf auftreten kann. Im Flugzeug tritt dieser Fall bei gleichzeitiger Betätigung mehrerer hydraulischer Organe ein. Federbelastete Speicher werden als Zylinder ausgeführt, ein Kolben trennt das Drucköl vom Federraum. Bei druckgasbelasteten Speichern trennt eine Membran das Öl vom Gas; sie sind kugelförmig gestaltet.

Systemaufbau: Das hydraulische Bordsystem setzt sich aus einem Versorgungs-, Leitungs- und Verbrauchersystem zusammen. Diesem kann noch ein Überwachungssystem übergeordnet eingebaut sein.

Die hydraulische Fluglagensteuerung (Ruder und Klappen) erfolgt bei Verkehrsflugzeugen und Waffenträgern aus Sicherheitsgründen durch zwei oder drei voneinander völlig unabhängige Systeme, die außerdem von den übrigen Funktionen getrennt arbeiten (Fahrwerk, Bremsen).



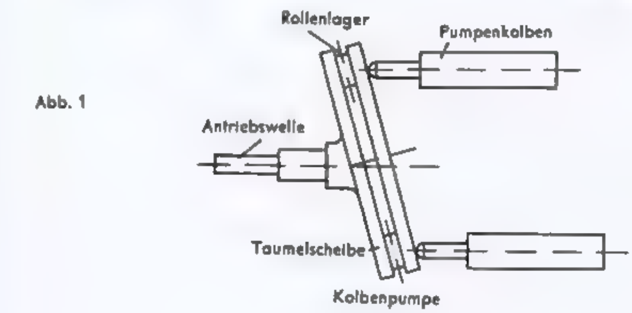


Abb. 1

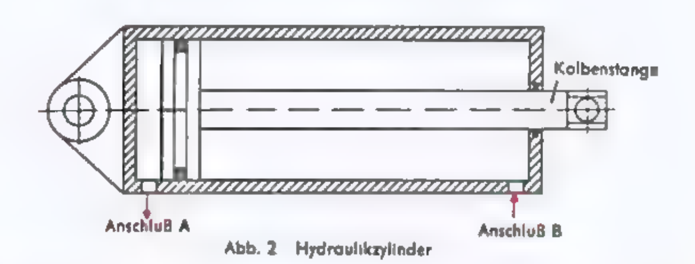


Abb. 2 Hydraulikzylinder

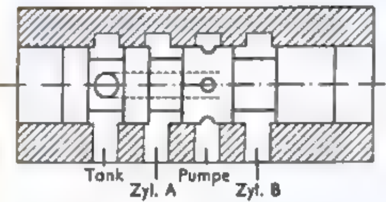


Abb. 3 4/3-Wegeventil

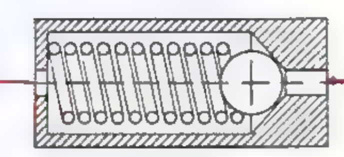
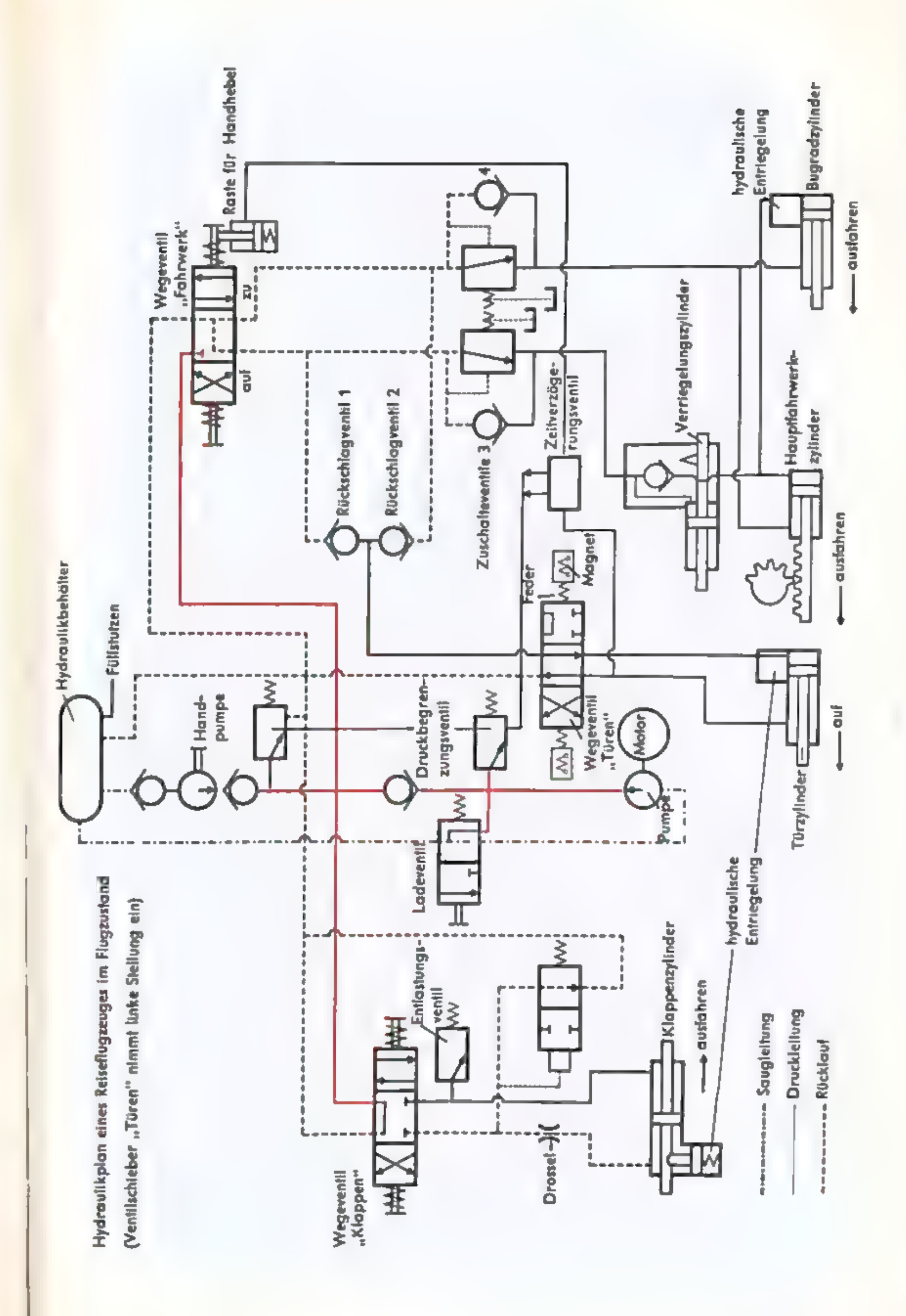


Abb. 4 Rückschlagventil

HYDRAULISCHE BORDSYSTEME II

Der Systemdruck beträgt in der Regel 210 kp/cm², bei modernen Ausführungen arbeitet man jedoch bereits mit 280 kp/cm² bis 350 kp/cm².
Als Arbeitsflüssigkeiten stehen der Flughydraulik Mineralöle, Wasser-Glykol-Lösungen für feuersichere Systeme und synthetische Flüssigkeiten auf Kieselsäureesterbasis für erhöhte Temperaturanforderungen zur Verfügung.
Die zeichnerische Darstellung eines Hydrauliksystems geschieht ähnlich wie in der Elektrotechnik durch international übliche Symbole.
Das System betätigt Klappen, Fahrwerk und die zur Abdeckung der Fahrwerkschächte dienenden Türen. Klappen und Fahrwerk können nicht gleichzeitig ausoder eingefahren werden, da ein Speicher fehlt. Die mit dem Flugzeugmotor gekuppelte Zahnradpumpe fördert fünf Liter pro Minute bei einem Druck von 105 kp/cm².
Das Arbeiten des Hydrauliksystems eines sechssitzigen Reiseflugzeuges wird anhand des dargestellten Hydraulikplans erläutert.
1. Fahrwerk. Das Ausfahren des Fahrwerks wird durch Schalten eines Handhebels eingeleitet. Dadurch werden folgende Vorgänge ausgelöst:
a) das Wegeventil „Fahrwerk" wird aus der gesperrten Mittelstellung mechanisch in die Ausfahrstellung gebracht;
b) das Ladeventil schaltet den Leerlauf der Pumpe ab, so daß das System unter Druck gesetzt wird;
c) über einen Endschalter wird die Stromzufuhr eines Magnets des Wegeventils „Türen" unterbrochen. Der Ventilschieber fährt in die federzentrierte Mittelstellung, in der die zum Öffnen der Türen notwendigen Ölkanäle miteinander verbunden sind. Während des Fluges steht also ein Magnet ständig unter Spannung, um den Schieber in Endstellung zu halten. Diese Ausführung wurde gewählt, um die Türen auch bei Stromausfall öffnen zu können, denn dabei spielt sich der gleiche Vorgang ab wie beim Abschalten der Stromzufuhr durch den Endschalter.
Der Ölstrom gelangt über das Wegeventil „Fahrwerk" und das Rückschlagventil 1 zum Wegeventil „Türen" und von dort zu den Türzylindern. Das Drucköl löst zunächst die mechanische Verriegelung der Türzylinder, dann geben die Türen die Fahrwerkschächte frei. Nach Erreichen der geöffneten Endstellung steigt der Systemdruck an. Bei 40 kp/cm² gestattet das Zuschaltventil 3 dem Ölstrom den Weg zu den Verriegelungszylindern des Fahrwerks. Unter der Einwirkung des Öldrucks setzen sich die Kolben in Bewegung und stoßen dabei die eingebauten Rückschlagventile durch Nocken auf. Gleichzeitig werden die mechanischen Sperren des Fahrwerks aufgehoben. Über die Rückschlagventile strömt das Öl in die Fahrwerkszylinder, die Bug- und Hauptfahrwerk ausfahren. Nach Abschluß aller Bewegungen steigt der Öldruck mangels weiterer Ausbreitungsmöglichkeiten weiter an. Bei etwa 80 kp/cm² wird der eingerastete Handhebel freigegeben, das Wegeventil „Fahrwerk" geht in Mittelstellung und entlastet das System. Das Fahrwerk wird wieder mechanisch verriegelt, ein Endschalter veranlaßt das Wegeventil „Türen" zum Schließen der Türen.
Beim Einziehen des Fahrwerks vollzieht sich der umgekehrte Vorgang. Es schaltet sich lediglich noch ein Zeitverzögerungsventil ein, das den Druckaufbau zum Schließen der Türen von drei auf neun Sekunden hinausschiebt, um sicherzustellen, daß das Fahrwerk vorher vollständig eingefahren und verriegelt ist.
2. Klappen. Über einen Handhebel wird das Wegeventil „Klappen" in die Ausfahrstellung gebracht. Dies hat wie beim Ausfahren des Fahrwerks zur Folge, daß das Ladeventil den Leerlauf der Pumpe schließt.



Hydraulikplan eines Reiseflugzeuges im Flugzustand
(Ventilschieber „Türen" nimmt linke Stellung ein)

FLUGNAVIGATION I

Vertikale Navigation: Mit Hilfe eines Aneroid-Dosenbarometers wird zuerst an Bord des Flugzeuges der statische Luftdruck gemessen. Der Dosenhub wird als Maß für den örtlichen statischen Luftdruck genommen und über eine Eichformel zur Flughöhe in Beziehung gesetzt. Die Anpassung an den örtlichen Bodendruck erfolgt über ein Getriebe von Hand (Subskala; Abb. 1). Dem Druck wird ein Höhenwert, die Druckhöhe, zugeordnet. In der Einheit 100 Fuß heißt die Druckhöhe Flugfläche; Bezugsniveau ist die 1013,3-mb-Isobare. Im System der Flugflächen, das die Einhaltung eines senkrechten Passierabstandes zwischen den Flugzeugen untereinander gewährleistet, fliegen die Flugzeuge während des Streckenfluges. Bei Start und Landung muß die Anzeige des barometrischen Höhenmessers ein Maß für die Höhe des Flugzeuges über NN (Altitude) oder über der Flugplatzhöhe (Height) sein (Abb. 2). Um die Werte zu erhalten, verschiebt man mittels eines Stellknopfes die Eichkurve des Höhenmessers senkrecht. Die Systeme der QNH-Höhen (QNH ist der Druckwert, der auf der Subskala des barometrischen Höhenmessers eingestellt werden muß, damit er bei der Landung des Flugzeuges die Höhe des Flugplatzes über NN, die Elevation, anzeigt) und QFE-Höhen (QFE ist der aktuelle Luftdruck in Höhe des Flugplatzes) sind demzufolge gegen das System der Flugflächen senkrecht versetzt (Abb. 3). Das Ausmaß der senkrechten Versetzung hängt von der Höhe des Flugplatzes über NN und vom aktuellen Luftdruck in Flugplatzhöhe ab. Nach dem Start wird vom Piloten beim Passieren der Übergangshöhe der Höhenmesser von QNH auf 1013,3 mb eingestellt. Vor dem Landeanflug erfolgt die Umstellung von 1013,3 mb auf QNH beim Passieren der Übergangsflugfläche. Der Luftraum zwischen Übergangshöhe und Übergangsflugfläche heißt Übergangsschicht, ihre minimale Mächtigkeit wird im allgemeinen auf 1000 Fuß festgelegt (1 Fuß = 0,305 m).
Funkhöhenmesser messen zusätzlich die Höhe eines Flugzeuges über dem Erdboden. Ein Funksignal wird zum Boden gestrahlt, reflektiert und wieder empfangen. Aus der Laufzeit wird die Höhe auf elektronischem Wege bestimmt (Abb. 4). Eine verwertbare Anzeige erhält man nur über ebenem Terrain oder über Wasserflächen, da sich Unebenheiten des Erdbodens in der Anzeige voll auswirken. Die Differenz zwischen der Anzeige des Funkhöhenmessers und der Druckhöhe heißt D-Wert. Der D-Wert gestattet die Bestimmung des Driftwinkels und damit die Berücksichtigung des Windeinflusses. Besondere Bedeutung hat dieses Verfahren auf den großen Überwasserflugrouten erlangt. Im *Variometer* wird als Meßgeber eine Membrandose verwendet. Ein Luftvolumen steht über einen Strömungswiderstand (Kapillare, Schlitz, Diffusor) mit dem statischen Druck der Außenluft in Verbindung. Bei Höhenänderung ändert sich der statische Druck; der Druckausgleich zum Luftvolumen kann wegen des Strömungswiderstandes nur langsam erfolgen. Die Druckdifferenz am Widerstand ist ein Maß für die Vertikalgeschwindigkeit (Abb. 5).
Kursbestimmung: Die Richtung eines Flugweges wird durch den Winkel bezüglich einer Referenzrichtung gemessen (Abb. 6, S. 605). Diese Richtung kann rechtweisend Nord, mißweisend Nord, Gitternord oder Kompaßnord sein. Winkel zwischen der Referenzrichtung und der Flugzeuglängsachse nennt man Steuerkurs, Winkel zwischen der Referenzrichtung und der Tangente an den Flugweg über Grund nennt man Kurs. Kurs und zugehöriger Steuerkurs unterscheiden sich um den Luvwinkel *l*: Steuerkurs = Kurs + + Luvwinkel.
Kurs und zugehöriger Steuerkurs sind gleich, wenn kein Wind vorhanden ist. In Abb. 6 ist *l* negativ (Winkel in Drehrichtung des Uhrzeigers sind positiv). Rechtweisender und mißweisender Kurs (oder Steuerkurs) unterscheiden sich um die Ortsmißweisung. Kompaß- und mißweisender Kurs (oder Steuerkurs) unterscheiden sich um die Deviation. Zusammengefaßt gilt: Rechtweisender Kurs = Kompaßkurs + Ortsmißweisung + Deviation (Fehler durch bordeigene magnetische Störfelder).

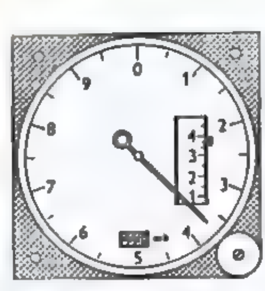


Abb. 1 Anzeige der barometrischen Höhenmessung

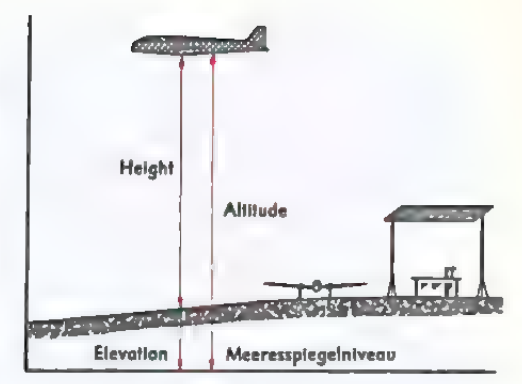


Abb. 2

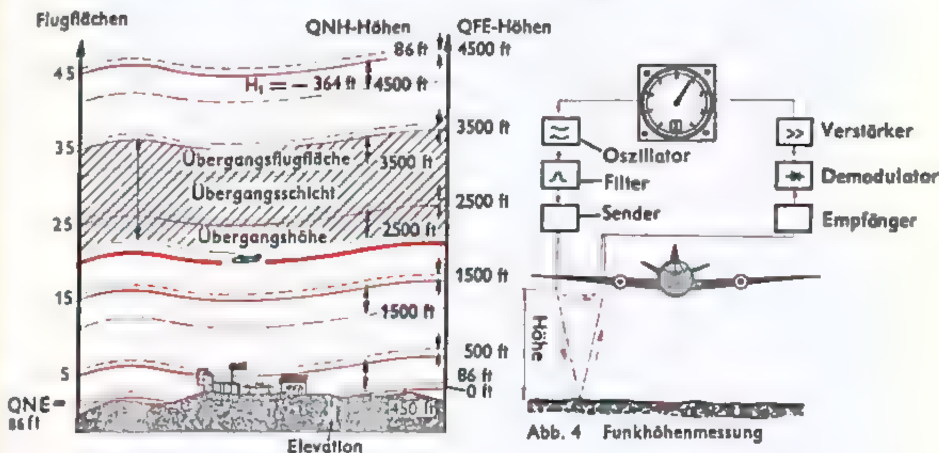


Abb. 3

Abb. 4 Funkhöhenmessung

Abb. 5 Luftdruck-Variometer

FLUGNAVIGATION II

Bei konstantem rechtweisendem Kurs ist der Flugweg über Grund eine Loxodrome oder Kursgleiche (vgl. S. 568). Der kürzeste Flugweg von A nach B ist nicht die Loxodrome, sondern der Großkreis oder die Orthodrome. Man bestimmt den Großkreis (z. B. mit Hilfe einer Zentralprojektionskarte) und nähert ihn durch einen Polygonzug von Loxodromenstücken, die mit Hilfe eines Magnetkompasses oder einer kompaßgeführten Kurskreiselanlage gesteuert werden können an. Der Kurskreisel zeigt das Azimut in Bezug auf eine gewählte Richtung (z. B. rechtweisend Nord). Der bord- und gehäusefeste Steuerstrich (Abb. 7) dreht sich bei Kursänderungen relativ zum kardanisch aufgehängten raumfesten Kreisel; die Ablesung erfolgt am Kursrahmen. Wegen der Referenz zum geographischen (bewegten) System und infolge von Gerätefehlern wandert der Kreisel aus der Soll-Lage (Drift), die Langzeitkonstanz ist also begrenzt. Für längere Flüge ist der Kreisel mit einem Meßsystem für das erdmagnetische Feld kombiniert (kompaßgeführte Kurskreiselanlage). Für Flüge in größeren Höhen verwendet man vorteilhaft die Astropeilung (s. u.). Bei der Kursmessung mit dem Kurskreisel dient als Referenzrichtung Gitternord. Meistens wird Gitternord in die Richtung von Greenwich zum Nordpol längs des Meridians von Greenwich gelegt (Gittersystem von Admiral Tonta), und man benutzt zur Orientierung ein Gitter, das aus Linien besteht, die parallel zum Meridian von Greenwich verlaufen. Ein Flugweg konstanten Gitterkurses ist ein Großkreis, so daß für die Gitternavigation Karten zweckmäßig sind, in denen Großkreise zumindest annähernd durch Geraden dargestellt werden. Zwischen dem Gitterkurs und dem rechtweisenden Kurs besteht in einer solchen Karte die Beziehung: Gitterkurs = rechtweisender Kurs ± Kegelkonstante × geographische Länge. Die Gitternavigation wird vorwiegend in hohen Breiten angewendet, da in diesen Regionen der Magnetkompaß versagt.

Eine astronomische Kursbestimmung wird mit Hilfe des Astrokompasses durchgeführt. Die vom Azimut der Sonne abhängige Polarisation des Himmelsstreulichtes nutzt hingegen der für die lange Polardämmerung entwickelte Dämmerungskompaß aus. Mit beiden Instrumenten wird die von Zeit zu Zeit notwendige Korrektur des Kurskreisels durchgeführt.

Geschwindigkeitsmessung: Man unterscheidet zwischen dem Betrag der Geschwindigkeit gegenüber der umgebenden Luft v_e, dem Betrag der Geschwindigkeit über Grund v_g und der Windgeschwindigkeit nach Größe und Richtung v_w. Es ist v_g die vektorielle Summe von $v_e + v_w$. Das von den drei Vektoren gebildete Dreieck nennt man Winddreieck (Abb. 8); es ist für die gesamte Flugnavigation von grundlegender Bedeutung.

Die Bestimmung der Eigengeschwindigkeit von Flugzeugen relativ zur umgebenden Luft geschieht vorwiegend über Staudruckmessung mit dem *Fahrtmesser*. Meßgeber ist das außerhalb des Rumpfes im freien Luftstrom angebrachte Prandtl-Rohr. Die Differenz zwischen Gesamtdruck und statischem Druck wird über eine Membrandose gemessen und angezeigt (Abb. 9). Zur Ermittlung der genauen Werte ist der Einfluß der veränderlichen Luftdichte zu berücksichtigen. Für die Navigation ist die Geschwindigkeit über Grund wichtig; sie ist bei Kenntnis des örtlichen Windvektors berechenbar. Die direkte Messung der Grundgeschwindigkeit kann mit dem Dopplergerät erfolgen.

Ortung: Die Sichtbeobachtung des überflogenen Gebietes ist heute bedeutungslos. Bei Flügen über unbesiedelten Gebieten erfolgt die Ortsbestimmung durch Peilung von Gestirnen; hierfür wird heute vorwiegend der Periskopsextant verwendet (Abb. 10). Das Gerät wird für die Messung durch eine Öffnung im Rumpf nach außen geschoben; Entwicklungstendenz: stetige Messung durch automatische Beobachtung (selbsttätiges Nachführen der Peiloptik). Am weitesten ist in der Verkehrsluftfahrt die *Funkortung* verbreitet. Bei der Funkeigenpeilung wird an Bord des Flugzeuges mittels einer Richtempfangsantenne gemessen, unter welchem Winkel relativ zur Flugzeuglängs-

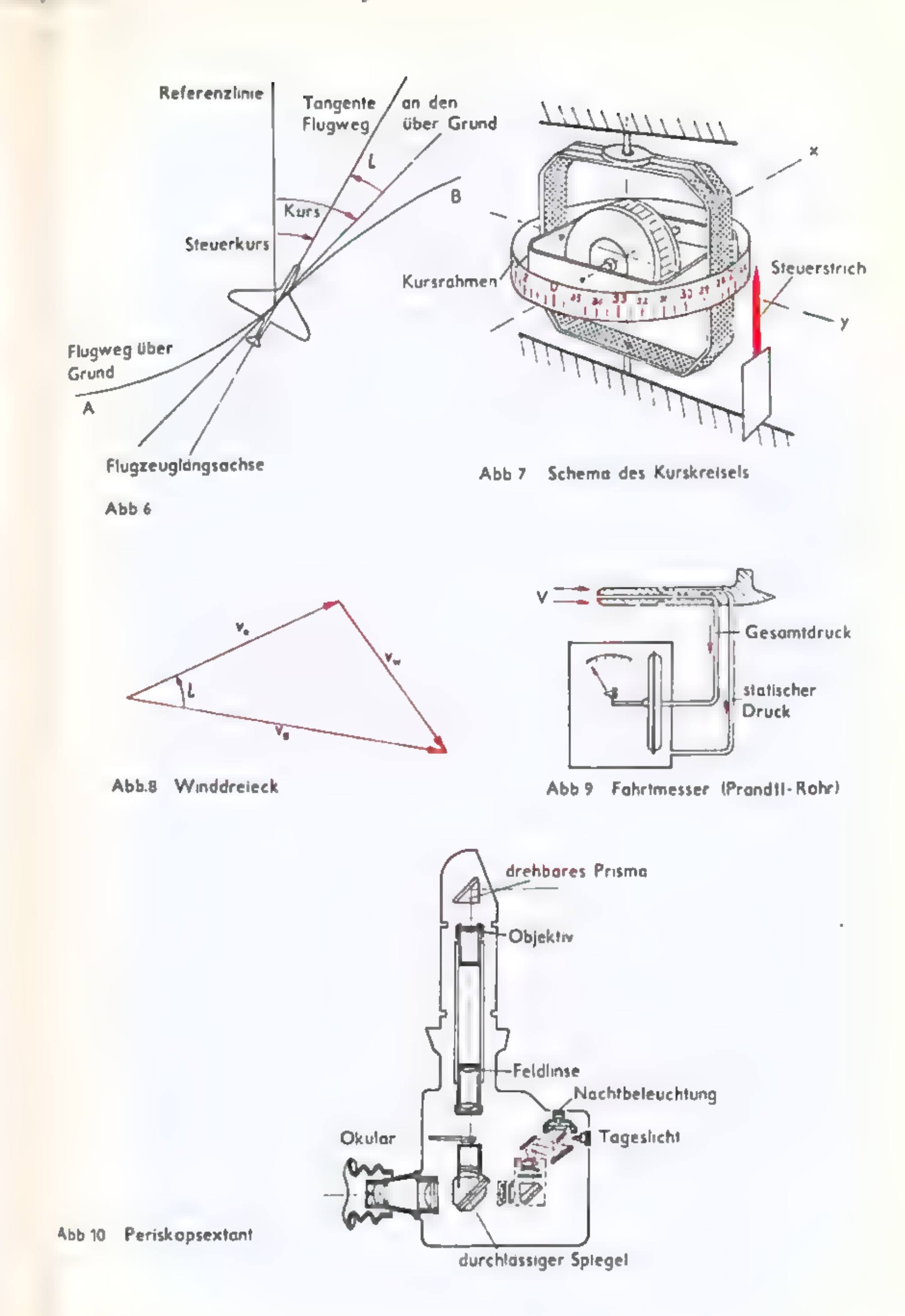


Abb 6

Abb 7 Schema des Kurskreisels

Abb. 8 Winddreieck

Abb 9 Fahrtmesser (Prandtl-Rohr)

Abb 10 Periskopsextant

achse die elektromagnetischen Wellen einfallen. Dieser Einfallswinkel ist die Funkseitenpeilung (ϟ). Zur Funkseitenpeilung wird der rechtweisende Steuerkurs addiert, und man erhält die rechtweisende Funkpeilung (rw ϟ). Die Addition von 180° liefert den Funkstandlinienwinkel (ϟ Stdlw.), dessen einer Schenkel die Funkstandlinie ist (Abb. 11). Der Schnitt mehrerer Standlinien (meistens peilt man drei Sender an) liefert den Standort. Bei Funkpeilungen über große Entfernungen muß die rw ϟ korrigiert werden (Loxodromenbeschickung, Großkreisbeschickung).

Der Funkkompaß ist ein MW-Empfanger, dessen Antennenanordnung mit Kardioidcharakteristik über eine automatische Nachführvorrichtung stets auf den gewählten Sender ausgerichtet wird. Die Stellung der Antenne als Maß für die Richtung des Senders zur Flugzeuglängsachse wird dem Piloten angezeigt (Abb. 12). Wird nicht an Bord des Flugzeuges ein bodenseitig installierter Sender, sondern von einer anderen Empfangsstation der Bordsender des Flugzeuges angepeilt, so spricht man von Fremdpeilung. Andere Funkortungssysteme liefern ein bodenfestes System von Standlinien. Das *VOR*-(Abk. für: *V*ery High Frequency *O*mnidirectional *R*ange) *Verfahren*, bei dem der Bordempfänger des VOR-Gerätes das Signal der ausgewählten Bodenstation (Bereich 112–118 MHz) empfängt und aus einem Phasenvergleich zwischen Bezugs- und richtungsabhängiger Phase das Azimut des Senders bezüglich des Empfängers bestimmt, liefert von einem Punkt strahlenförmig ausgehende Standlinien, während z. B. das *Decca-Verfahren* ein bodenfestes System von Hyperbeln ergibt. Zur Funkortung gehört ferner die Bestimmung der Position eines Flugzeuges mittels eines auf dem Boden installierten Radargerätes.

Vollkommen unabhängig von äußeren Signalen ist die *Inertialortung*. Auf einer stabilisierten Plattform sind Beschleunigungsmesser in drei (meist zueinander rechtwinkligen) Richtungen befestigt. Diese Geräte messen die nichtgravitativen Beschleunigungen in ihren Komponenten zum gewählten Koordinatensystem. Durch ein- bzw. zweimalige Integration erhält man die augenblickliche Geschwindigkeit sowie den zurückgelegten Weg (Abb. 13). Die Stabilisierung der Plattform wird vorwiegend mit Kreiseln durchgeführt. In Erdnähe ist ein Nachdrehen entsprechend der Gestalt der Erdkugel zum Horizontieren erforderlich; wie bei allen Kreiselgeräten ist für längere Flugzeiten eine Stützung durch andere Verfahren notwendig. Hier wie bei anderen Verfahren können die gewonnenen Werte auf einen Autopiloten (Flugregler) geschaltet werden, der anstelle des Piloten die Übertragung auf die Ruder des Flugzeuges vornimmt.

Das heute übliche *Anflugverfahren* ist das Instrumentenlandesystem ILS (Abk. für: *I*nstrument *L*anding *S*ystem). Von zwei Antennensystemen am Boden werden Funksignale abgestrahlt, die Leitebenen für die horizontale und vertikale Führung bilden (Abb. 15). Abweichungen von diesen Ebenen lassen sich aus dem Anwachsen der Signalstärke des entsprechenden Sektors erkennen. Die Anzeige erfolgt als Kommandosignal mit dem Kreuzzeigergerät (Abb. 14). Es ist je ein Zeiger für die Horizontal- und Vertikalführung vorhanden. Eine grobe Entfernungsanzeige ergibt sich beim Durchfliegen der Markierungsfunkfeuer Outer Marker (OM), Middle Marker (MM) und Boundary Marker (BM). Der Bordempfänger setzt die Funksignale in hörbare und visuelle Kennungen um. Fur Blindlandungen reicht die Genauigkeit des gegenwärtig gebräuchlichen Instrumentenlandesystems nicht aus, doch wird an seiner Verbesserung gearbeitet. Bei einem anderen Anflugverfahren wird das Flugzeug von einem am Boden installierten Radargerät verfolgt, der Pilot erhält über Funk Anweisungen, das Flugzeug wird „heruntergesprochen" (talk down). Dies ist der bodenseitig kontrollierte Anflug GCA (Abk. für: *G*round *C*ontrolled *A*pproach).

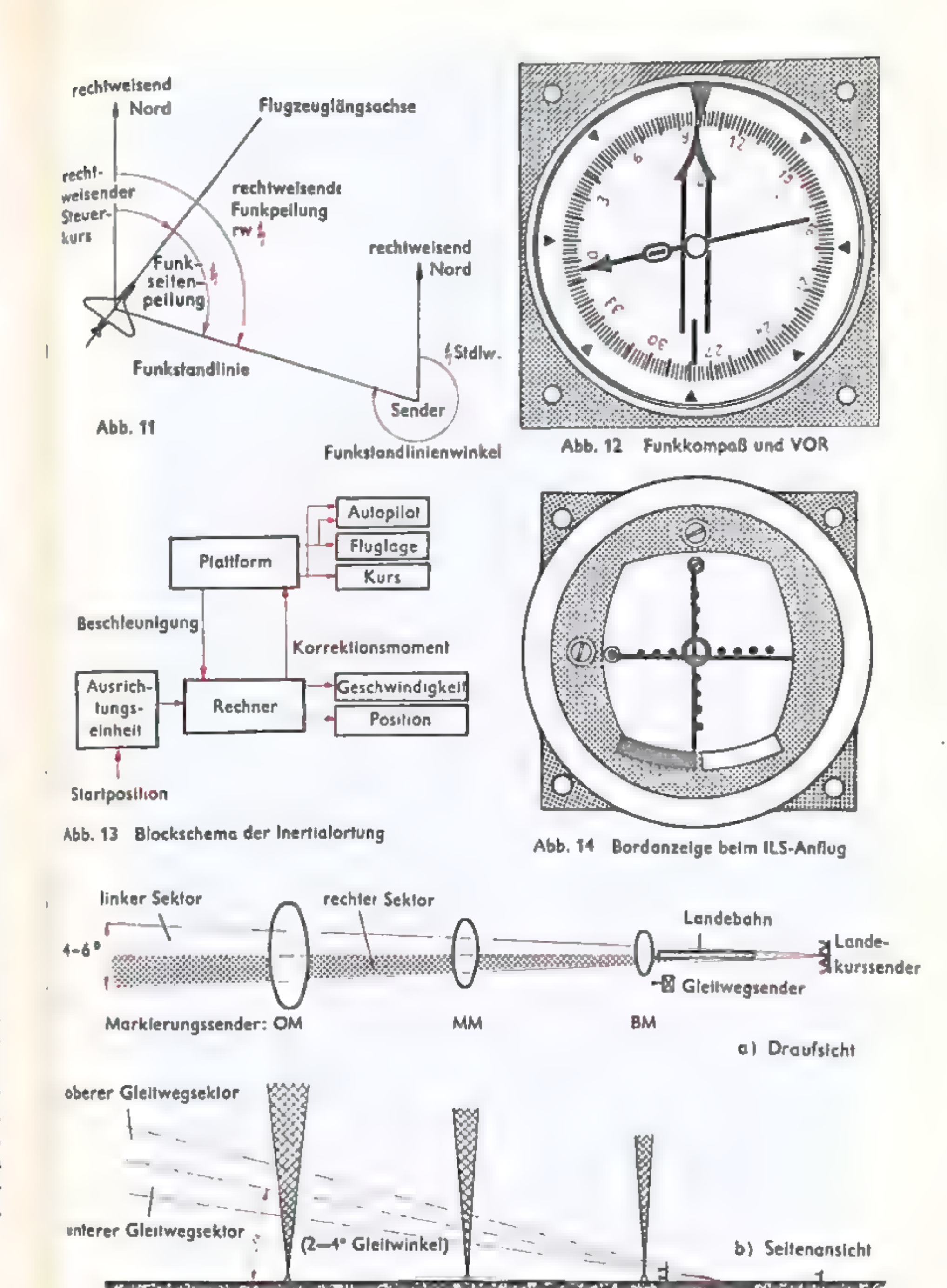


Abb. 11

Abb. 12 Funkkompaß und VOR

Abb. 13 Blockschema der Inertialortung

Abb. 14 Bordanzeige beim ILS-Anflug

Abb. 15 Das Instrumentenlandesystem (ILS)

HUBSCHRAUBER

Beim Hubschrauber tritt an die Stelle des festen Tragflügels ein Drehflügel (Rotor), dessen Blätter mit einem Tragflügelprofil ausgestattet sind. Die Schwebefähigkeit oder der Auftrieb eines Tragflügels hängt von zwei Faktoren ab: dem Anstellwinkel des Flügels (Abb. 1) und der Geschwindigkeit der anströmenden Luft. Da beim Flugzeug Flügel und Rumpf eine Einheit bilden, muß es eine Geschwindigkeit nach vorwärts haben, um den notwendigen Auftrieb zu erhalten (s. S. 582). Beim Hubschrauber wird die Luftgeschwindigkeit durch die Rotation der Drehflügel erzeugt; wenn der Anstellwinkel einen bestimmten Wert erreicht hat, beginnt der Auftrieb die Schwerkraft zu überwinden. Bei großer Steiggeschwindigkeit muß sowohl die Drehgeschwindigkeit des Rotors als auch der Anstellwinkel der Blätter groß sein. Die Maschine steigt senkrecht nach oben, weil der Auftrieb genau in Richtung der Rotorachse wirkt (Abb. 2). Soll nun eine Vorwärtsbewegung zustande kommen, so kippt der Pilot die Maschine um einen bestimmten Winkel nach vorwärts (Abb. 3), indem er dem Rotorblatt, das gerade über das Heck der Maschine streicht, einen größeren Anstellwinkel gibt, wodurch dessen Auftrieb größer wird als der der anderen Blätter. Die Kraft (in Abb. 3 die Resultierende), die beim Senkrechtflug voll als Auftrieb wirkte, wird in dieser Stellung der Maschine aufgespalten in einen Teil für den Auftrieb und einen Teil für die Zugkraft zur Vorwärtsbewegung. Der Steuerkopf mit der Taumelscheibe (Abb. 4) sorgt dafür, daß jeweils das richtige Blatt im richtigen Augenblick steiler angestellt wird. Die untere Scheibe der Taumelscheibe wird durch die Steuergeräte des Piloten über die Steuerstangen in einem bestimmten Winkel zur Rotorachse starr festgehalten. Die Stoßstangen ziehen, während sie um die Rotorwelle kreisen, die um ihre Längsachsen drehbaren Blätter hoch oder nieder und verändern so den Anstellwinkel.
Die in Abb. 4 sichtbaren Schlaggelenke erfüllen eine andere Aufgabe: In Abb. 5 gibt *R* die Dreh- und *T* die Bewegungsrichtung an. Auf der Rotorfläche muß man zwei Abschnitte (Linie xx) unterscheiden. Auf der rechten Seite addieren sich die Auftriebskräfte aus der Luftströmung, die durch Dreh- und Vorwärtsbewegung entstanden ist, während auf der linken Seite der Auftrieb aus der Drehbewegung um den Betrag aus der Vorwärtsbewegung kleiner ist. Der Auftrieb *A* ist auf der rechten Seite stärker, der Hubschrauber müßte bei zunehmender Geschwindigkeit nach links abkippen und schließlich umschlagen. Ein Flügelblattlager mit einem Gelenk senkrecht zur Drehachse (Abb. 6) ermöglicht den Flügelblättern Schlagbewegungen, die die unerwünschten Kippmomente ausschalten. Jedes Flügelblatt ist so zu jeder Zeit im Gleichgewichtszustand: Die Gelenke können keine Kippmomente übertragen, die Flügelblätteranschlüsse sind keine Verbiegungen, sondern nur mehr der zentrifugalen Beanspruchung unterworfen; jedes Flügelblatt geht bei jedem Umlauf auf der Seite in die Höhe, über die es bei seiner Drehung in die Hälfte mit dem höheren Auftrieb gelangt. Die vertikale Schlagbewegung der Blätter beeinflußt auch periodisch den Anstellwinkel der Luft und reguliert so den Auftrieb des Flügelblattes während seiner Umdrehung; so werden auch Belastungsschwankungen vermieden. Setzt sich beim Hubschrauber der Rotor in Drehbewegung, so ist der Flugzeugrumpf bestrebt, sich entgegengesetzt zu drehen (Newtonsches Prinzip: Wirkung ist gleich Gegenwirkung). Durch zwei gegenläufige Rotoren oder eine seitlich angebrachte Heckschraube (Abb. 7) können diese Drehbewegungen ausgeglichen werden; bei der Verwendung von kleinen Rückstoßturbinen an den Rotorenden als Antrieb stellen sie sich nicht ein.

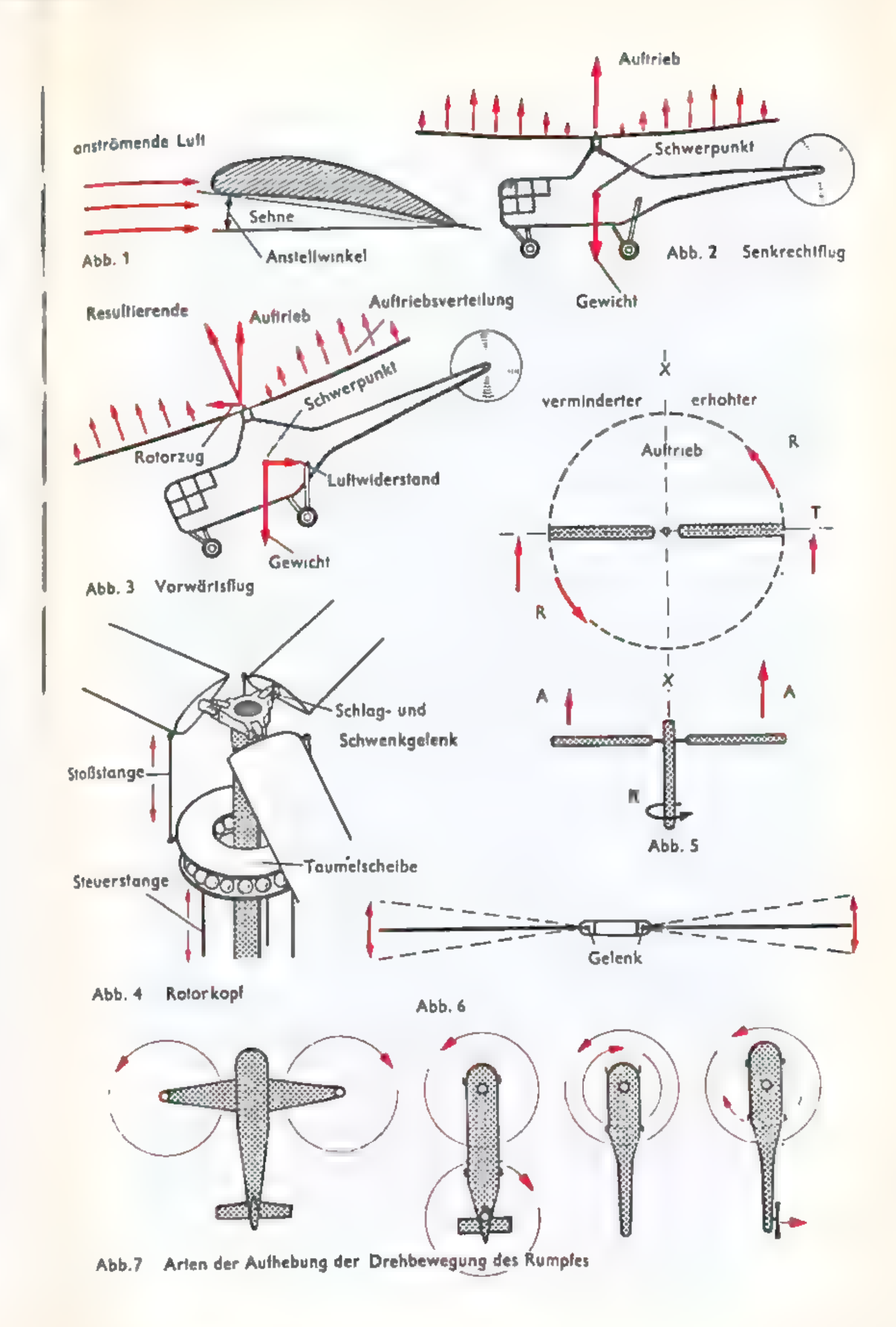


Abb. 7 Arten der Aufhebung der Drehbewegung des Rumpfes

FALLSCHIRM

Fallschirme werden hauptsächlich zum Herabsetzen der Sinkgeschwindigkeit beim Absprung von Menschen oder beim Abwerfen von Lasten aus Luftfahrzeugen verwendet. Ein Fallschirm gehört zu den selbständigen Luftfahrzeugen und unterliegt den für diese gültigen Gesetzen. Ein nach voller Entfaltung verzögerungsfrei sinkender Fallschirm befindet sich dann im störungsfreien Gleichgewicht, wenn die Resultierende der Luftkraft gleich dem Gesamtgewicht ist (Abb. 2). Die Größe der Widerstandskraft (W) ist dabei abhängig vom Quadrat der Sinkgeschwindigkeit (v), der Größe (F) der projizierten Fläche des Schirmes und dem spezifischen Gewicht (γ) der Luft: $W = \frac{\gamma}{2g} \cdot v^2 \cdot F$. Wird der Winkel der Anströmrichtung gleich Null, dann ist die Größe der Widerstandskraft gleich dem Gewicht bei gleichbleibender Sinkgeschwindigkeit.
Beim Absprung aus einem Flugzeug mit einem Fallschirm wird der Weg bis zum Erdboden in verschiedene Zonen eingeteilt (Abb. 1). In der Zone des freien Falls fällt der Körper mit stetig steigender Geschwindigkeit, bis er eine durch Luftwiderstand und Reibung bedingte Grenzgeschwindigkeit erreicht. Dann wird die Reißleine betätigt, der freie Fall wird erstmals verzögert, wenn sich der kleine Hilfsschirm öffnet. Ist dieser offen, so reißt er den großen Schirm aus der Verpackung und bremst den Fall weiter ab. Auf diese Art wird die Fallgeschwindigkeit von etwa 180 km/h im Zeitraum von zwei bis drei Sekunden auf 18 bis 25 km/h verringert. Diese Verzögerung ruft den Entfaltungsstoß hervor. Nach dem vollkommenen Öffnen beider Schirme beginnt die Sinkzone mit gleichbleibender Geschwindigkeit. Die Sinkgeschwindigkeit hängt dabei nicht nur von der Größe der projizierten Schirmfläche und der Schirmform, sondern natürlich auch von dem zu tragenden Gewicht, der Luftdurchlässigkeit des Schirmmaterials und der Luftdichte ab. Bei einer normalen Sinkgeschwindigkeit (18–25 km/h) ergibt sich ein Landestoß wie bei einem Sprung aus einer Höhe von etwa 1,5 m.
Man unterscheidet nach ihrer Öffnungsvorrichtung manuell betätigte und automatische Fallschirme. Bei ersteren zieht der Springer mittels eines Aufziehgriffes die Verschlußstifte aus den Verschlußkegeln (Abb. 3). Die Verschlußklappen werden von Gummikabeln aufgerissen; der Hilfsschirm wird herausgezogen, durch ein eingebautes Federgestell aus dünnem Federdraht aufgespannt und vom Luftstrom erfaßt. Der Hilfsschirm zieht zuerst die Kappe und die Fangleinen des Hauptschirmes in Strecklage (Abb. 4). Jetzt tritt die Luft vom Basisrand her unter die Schirmkappe und bringt diese zur vollen Entfaltung.
Beim automatischen Fallschirm ist die am Boden des inneren Verpackungssackes befestigte Reißleine mit ihrem freien Ende mit dem Flugzeug verbunden. Der Springer zieht durch sein Körpergewicht beim Fallen den Verschlußstift aus der Verschlußschlaufe und zieht den äußeren Verpackungssack vom inneren. Die Fangleinen werden frei und ziehen die Schirmkappe aus dem inneren Verpackungssack; sie öffnet sich im Luftstrom. Der innere Verpackungssack bleibt mit der Reißleine am Flugzeug hängen.

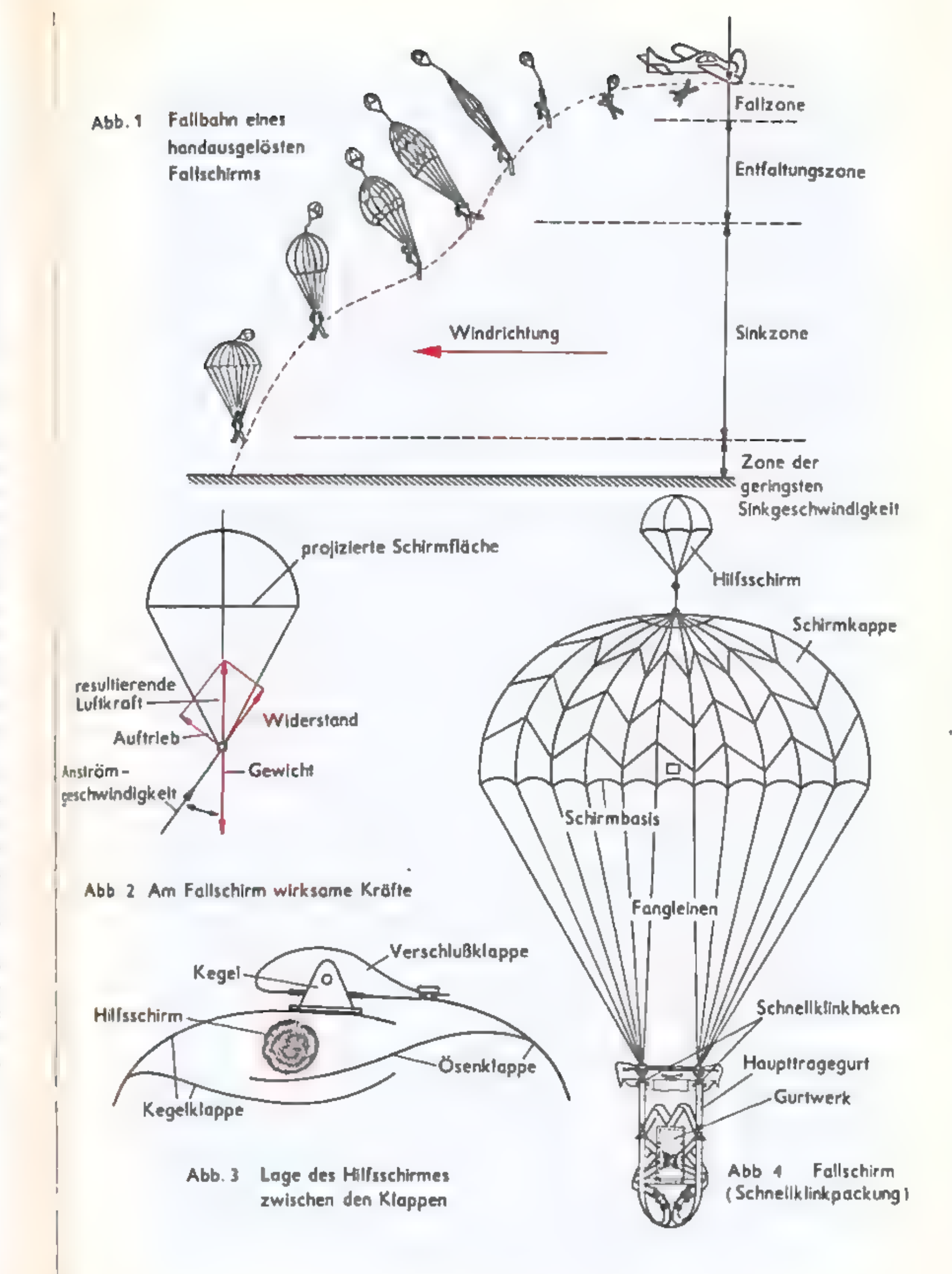


Abb. 1 Fallbahn eines handausgelösten Fallschirms

Abb 2 Am Fallschirm wirksame Kräfte

Abb. 3 Lage des Hilfsschirmes zwischen den Klappen

Abb 4 Fallschirm (Schnellklinkpackung)

RAKETENPRINZIP I

Die Wirkung eines Raketenantriebs beruht auf Newtons fundamentalem Gesetz von „Aktion" und „Reaktion", das in seiner einfachsten Form zum Ausdruck bringt, daß jede Kraft (Aktion) eine gleichgroße, entgegengesetzt gerichtete Kraft (Reaktion) auslöst. Ein alltägliches Beispiel dafür ist das unter den Strahltriebwerken auf S. 594 beschriebene Prinzip des Rasensprengers. In einem Modellversuch mit einem kleinen Luftballon läßt sich dieses Wechselwirkungsprinzip sogar am freien Flug darstellen. Aufgeblasen und losgelassen wird der Ballon in wilden Spiralen davonfliegen. Dabei steht die im Ballon enthaltene Luftmasse durch die Spannung der Ballonhülle gegenüber der Umgebungsatmosphäre unter Überdruck, der sich im Moment des Loslassens auszugleichen sucht. Es trennt sich also ein Teil der ursprünglichen Gesamtmasse (Luft- und Ballonmasse) mit einer dem Druck proportionalen Geschwindigkeit ab. Den dabei auftretenden Kraftstoß (Impuls) kann man auch gerichtet wirken lassen. Dazu wird ein aus mindestens drei (gegeneinander um 120° versetzten) kleinen Pappscheiben bestehendes Leitwerk mit einem Pappring am Luftballonstutzen befestigt, wodurch sich eine primitive aerodynamische Stabilisierung erreichen läßt (s. Abb. 1; s. Lageregelung S. 656).
Im angeführten Beispiel wird eine Masse (Luft) von einer ursprünglich mit ihr verbundenen Masse (Ballon und Luft) mit entsprechender Geschwindigkeit getrennt, so daß ein Impuls (Aktion) entsteht, der die Reaktion bewirkt. Dieses Reaktionsprinzip und damit die Funktion des Raketentriebwerkes lassen sich an drei physikalischen Modellen verdeutlichen.
1. Störung des in einem geschlossenen Behälter gegebenen Druckgleichgewichtes durch eine einseitige Behälteröffnung (s. Abb. 2 a): In einem Behälter wird zum Beispiel durch Verbrennung von Treibstoff Wärme und durch die damit verbundene erhöhte ungerichtete Molekular- bzw. Atombewegung ein Druck der Verbrennungsgase auf die Behälterwandung erzeugt. Unter der Voraussetzung eines geringeren Umgebungsdrucks wird dieser Behälterinnendruck entspannt, sobald der Behälter geöffnet wird, wobei die Verbrennungsmasse ausströmt. Öffnet man den Behälter nur auf einer Seite, z. B. durch eine Bohrung, so kann nur hier der Druckausgleich stattfinden; die im Behälter enthaltene Gasmasse tritt mit einer dem Druckunterschied und der Bohrungsgröße proportionalen Geschwindigkeit aus. Das Druckgleichgewicht auf die gegenüberliegenden Behälterwände wird entsprechend der Bohrungsgröße einseitig vermindert, so daß in Richtung der nicht durchbohrten Wand ein Schub entsteht, da hier der Druck voll erhalten bleibt.

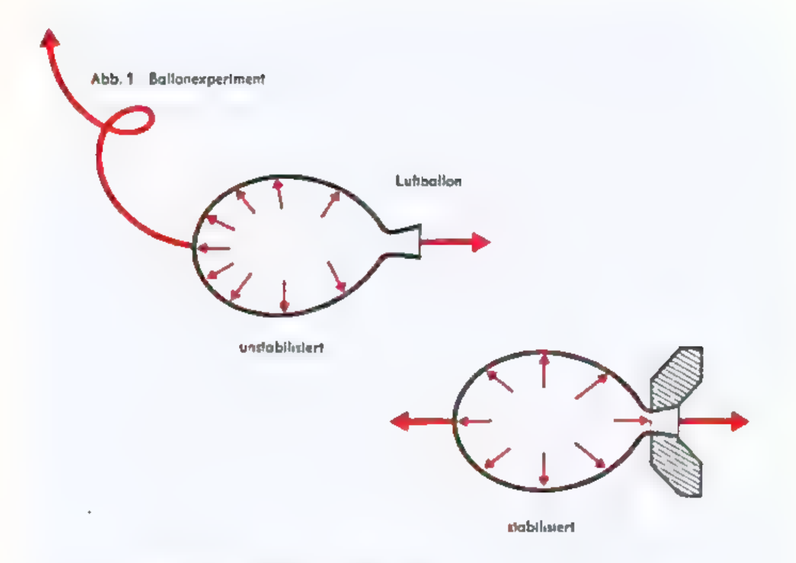
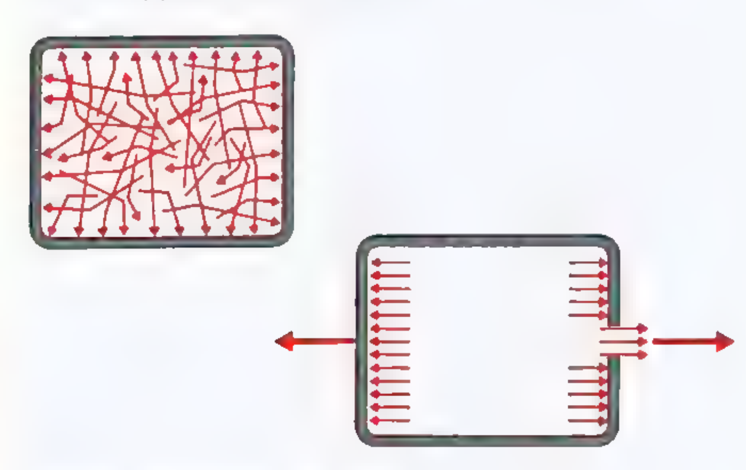


Abb. 1 Ballonexperiment

Abb. 2 Die drei physikalischen Modelle des Reaktionsantriebes

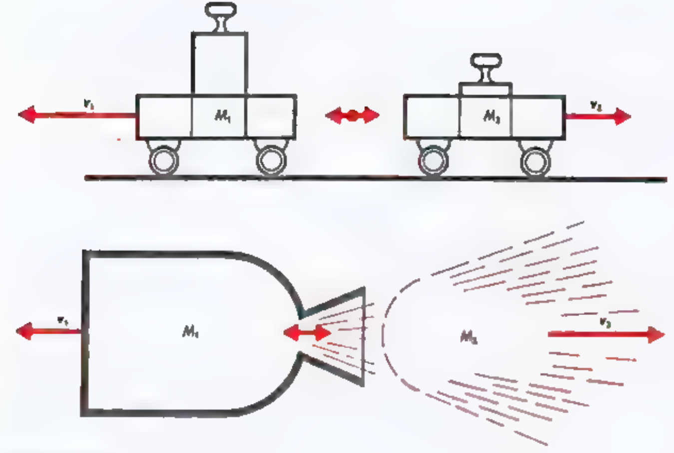

a) Störung des Druckgleichgewichtes in einem Behälter

RAKETENPRINZIP II

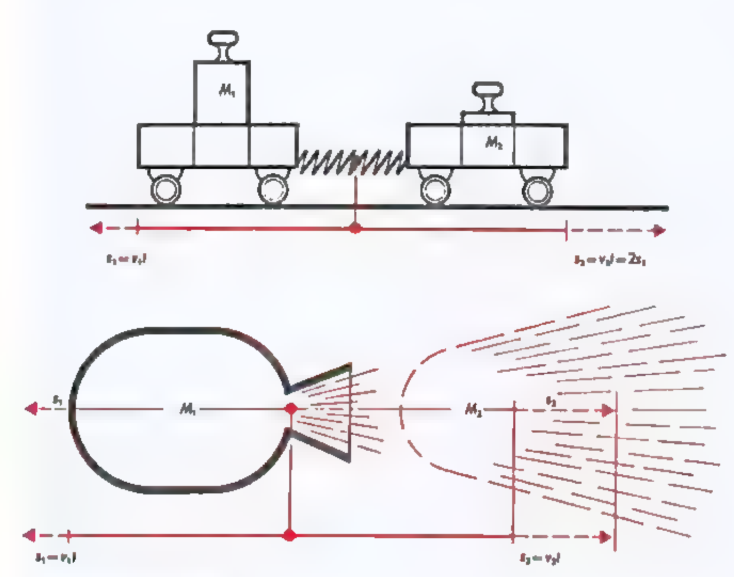
2. Eine ähnlich einfache Erklärung liefert der Lehrsatz von der Erhaltung des Impulses, der besagt, daß in einem System beliebig bewegter Körper die Summe aller Impulse solange konstant bleibt wie keine äußeren Kräfte wirksam werden (s. Abb. 2 b): Werden z. B. in einem Experiment zwei Spielzeugeisenbahnwagen mit einer zusammengedrückten Feder gekoppelt und Wagen 1 (mit der Masse m_1) genau doppelt so schwer belastet wie Wagen 2 (mit der Masse m_2), so erhalten beide Wagen gleich große Kraftstöße bei plötzlicher Entspannung der Feder. Der leichter belastete Wagen 2 wird jedoch infolge geringerer Masse in der gleichen Zeit weiter rollen als Wagen 1, da er aufgrund seiner Leichtigkeit eine höhere Geschwindigkeit entwickeln kann. Das Produkt aus Masse m_1 · Geschwindigkeit v_1 ist also gleich dem Produkt aus Masse m_2 · Geschwindigkeit v_2. Daraus resultiert, daß beide Massen gleiche Impulse erhielten.

3. Mit der gleichen experimentellen Anordnung ist auch eine Erklärung des Raketenprinzips nach dem Satz von der Erhaltung des gemeinsamen Schwerpunktes möglich (s. Abb. 2 c): Wie beobachtet, entfernen sich die beiden Wagen entsprechend ihren Massen unterschiedlich weit von ihrem Ursprungsort, da der schwerere Wagen langsamer als der leichtere fortrollt. Der gemeinsame Schwerpunkt, den beide Massen im unbewegten Zustand haben, behält auch nach Lösung der Feder seinen Ort bei, da die in gleichen Zeiten zurückgelegten Wege entsprechend den unterschiedlichen Massen verhältnisgleich sind. Masse m_1 · Strecke s_1 ist gleich Masse m_2 · Strecke s_2. Impuls- und Schwerpunktsatz sind also nur zwei Aussagen zum gleichen Sachverhalt, die je nach Zweckmäßigkeit wahlweise angewandt werden.

Die zeichnerische Gegenüberstellung der Modellexperimente mit den ihnen entsprechenden raketentechnischen Vorgängen verdeutlicht die drei Erklärungen des Raketenantriebsprinzips, wobei es sich bei der masse m_2 stets um die von dem Raketentriebwerk abgestoßene Gasmasse handelt. Die dadurch bewirkte Reaktionskraft wird in der Technik auch als Rückstoß, Schub bzw. Impuls bezeichnet. Dieser Schub P einer Rakete errechnet sich aus dem Produkt der Masse m des ausgestoßenen Gases pro Zeiteinheit t und seiner Ausströmgeschwindigkeit c. Es ist also $P = \frac{m}{t} \cdot c$ gemessen in Newton (1 Newton ist diejenige Kraft, die notwendig ist, um einem kg Masse die Beschleunigung von 1 m/sec² zu erteilen).



b) Impulserhaltungssatz



c) Schwerpunkterhaltungssatz

RAKETENGRUNDGLEICHUNG I

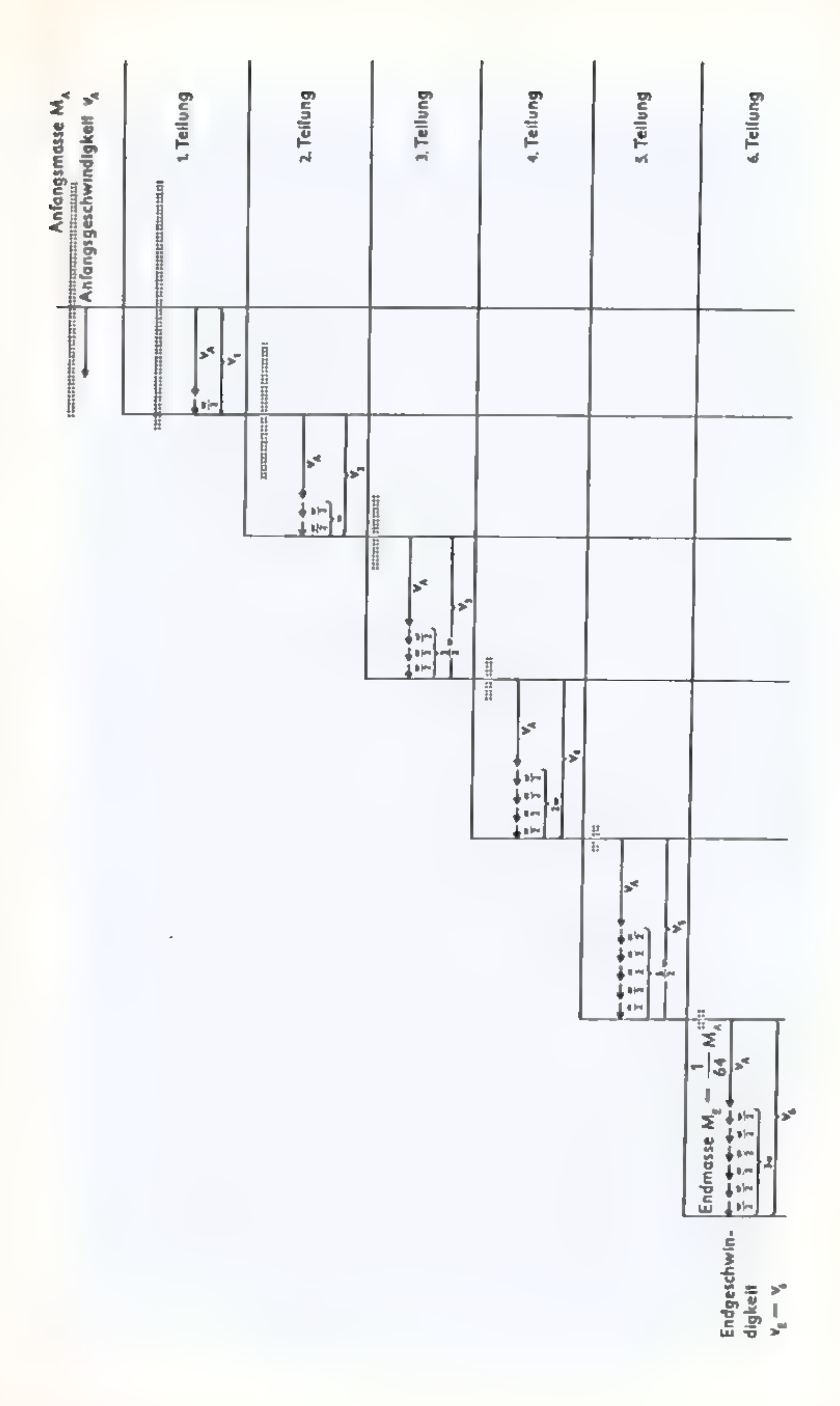
Nach dem auf S. 612 besprochenen Prinzip von Aktion und Reaktion erfolgt bei Abstoßung einer Masse die Reaktion der Restmasse, was einer einmaligen Kraftwirkung gleichkommt. In Anlehnung daran nun ließe sich bereits ein Vortriebssystem denken, das durch fortlaufende Abtrennung von Teilmassen der jeweils verbleibenden Restmasse eine zunehmende Geschwindigkeit durch ständige stoßweise Beschleunigung erteilt. Vorstellbar wäre z. B. ein Stab mit der Anfangsmasse m_A und der Anfangsgeschwindigkeit v_A, der so konstruiert ist, daß pro Sekunde jeweils die Hälfte des verbleibenden Reststabes mit einer Geschwindigkeit v abgestoßen wird. Dann ergäbe sich eine Teilungsfolge nach Abb. 1. Bei einer mit jeder Teilung verbundenen Geschwindigkeitszunahme verringert sich gleichmäßig die Restmasse, so daß nach 6 Sekunden z. B. nur noch $1/64$ der Anfangsmasse übrig bleibt. Um zu ausreichenden Fluggeschwindigkeiten zu gelangen, ist dieses Verfahren jedoch wenig geeignet, da die Restmasse zu schnell abnimmt.

Ein befriedigendes Ergebnis findet sich erst, wenn man mit starken Verkleinerungen der jeweils abgestoßenen Teile der Anfangsmasse arbeitet. Man gelangt so letztenendes in den Größenordnungsbereich der Moleküle. Moleküle haben auch noch eine, wenn auch relativ sehr geringe, Masse. Sie werden bei der Verbrennung von Treibstoffen in der Raketenbrennkammer erzeugt und bilden die Verbrennungsgasmasse. Diese heißen und dadurch unter sehr hohem Druck stehenden Verbrennungsgasmassen werden kontinuierlich abgestoßen. Dadurch wird der verbleibenden (gleichzeitig um die verbrauchte Treibstoffmenge leichter werdenden) Restmasse ein Impuls (Schub) erteilt. Aus der zeitlichen Aufeinanderfolge gleich großer Impulse bei sich stetig verringerndem Gewicht ergibt sich eine gleichförmig wirkende Beschleunigung und daraus die Geschwindigkeitszunahme.

Solch kontinuierlicher, durch ausströmende Gasmassen bedingter Reaktionsantrieb wird bei der Aufstellung der Raketengrundgleichung vorausgesetzt. Mit der Raketengrundgleichung läßt sich vereinfacht für einen widerstands- und schwerefreien Raum die erreichbare Höchst- bzw. Brennschlußgeschwindigkeit v_B einer Rakete bestimmen: Die Brennschlußgeschwindigkeit v_B ist gleich der Ausströmgeschwindigkeit c der Verbrennungsgasmassen multipliziert mit dem natürlichen Logarithmus ln des Verhältnisses von Anfangsmasse m_0 zu Endmasse m, als Formel ausgedrückt $v_B = c \cdot \ln\left(\frac{m_0}{m}\right)$.

m_0 und m sind für jeden Raketeneinsatz genau definiert, weil sich daraus der verfügbare Treibstoffanteil m_T an der Startmasse ergibt.

Unter der Annahme einer konstanten Ausströmgeschwindigkeit c zeigt Abb. 2 vereinfacht einige Auswirkungen der durch die Raketengrundgleichung gegebenen Zusammenhänge für eine Brennzeit von 100 s im Senkrechtstart. Eine alle 10 s vorgenommene Höhenmessung zur Ermittlung der zurückgelegten Teilstrecken ergibt nach den ersten 10 s nach Start 0,35 km, in den letzten 10 s vor Brennschluß 26,7 km Steighöhe, die Fluggeschwindigkeit nimmt dabei von 0,035 km/s auf 2,67 km/s zu. Gleichzeitig wird die Startmasse m_0 durch den für die Impulserzeugung erforderlichen Treibstoffverbrauch zur Brennschlußmasse m abgebaut.



RAKETENGRUNDGLEICHUNG II

Für die Praxis reicht diese vereinfachte Raketengrundgleichung, die auch „Bewegungsgleichung der Rakete" genannt wird, natürlich nicht aus, denn außer dem Luftwiderstand blieb die während der Brennzeit t wirkende Gravitation g (Schwerkraft) unberücksichtigt. Da sich die Gravitationswirkungszeit jedoch abschwächend auf die Geschwindigkeitszunahme auswirkt, muß ihr Wert abgezogen werden, so daß sich als Brennschlußgeschwindigkeit einer Rakete ergibt:

$$v_B = v \cdot \ln \frac{m_0}{m} - gt.$$

Die Einwirkung der Atmosphäre wird auch hierbei vernachlässigt, da diese zu stark von den örtlichen Verhältnissen und atmosphärischen Veränderungen abhängt und deshalb nur von Fall zu Fall bestimmt wird.
Wie aus der Gleichung ersichtlich ist, beeinflussen die Ausströmgeschwindigkeit der Verbrennungsgasmassen und das Verhältnis der Massen die Geschwindigkeitsentwicklung am nachhaltigsten. Die Ausströmgeschwindigkeit ist vor allem von dem Molekulargewicht M und der Temperatur T abhängig, d. h., sie ist proportional der Wurzel aus dem Verhältnis von Verbrennungstemperatur zu mittlerem Molekulargewicht der Ausströmgase: $c \sim \sqrt{T/M}$
und wird begrenzt durch die Höhe der Temperatur, die die Wände der Brennkammer und Düse aushalten können. Abb. 3 gibt einen Überblick über einige mit verschiedenen Treibstoffen erreichbare Ausströmgeschwindigkeiten, die damit jeweils möglichen maximalen Treibstoffanteile an der Startmasse und das maximale Antriebsvermögen, das sich in der Brennschlußgeschwindigkeit widerspiegelt. Die zweite wichtige Einflußgröße in der Raketengrundgleichung, das Massenverhältnis $\frac{m_0}{m}$ veranlaßt die Konstrukteure, das Gewicht der Einzelteile, Triebwerke und Tanks einer Rakete immer weiter zu verringern, denn ein großes Massenverhältnis ergibt sich nur bei kleiner Endmasse m und diese wiederum errechnet sich aus der Startmasse, vermindert um die von den Triebwerken während des Fluges verbrauchte Treibstoffmasse.
In Abb. 4 ist der Zusammenhang zwischen Massenverhältnis, idealer Brennschlußgeschwindigkeit und Ausströmgeschwindigkeit dargestellt. Wie eingezeichnet, würde eine Ausströmgeschwindigkeit von 3 km/s zu einem Massenverhältnis von 9 der Rakete einer Brennschlußgeschwindigkeit von 5,75 km/s ermöglichen.

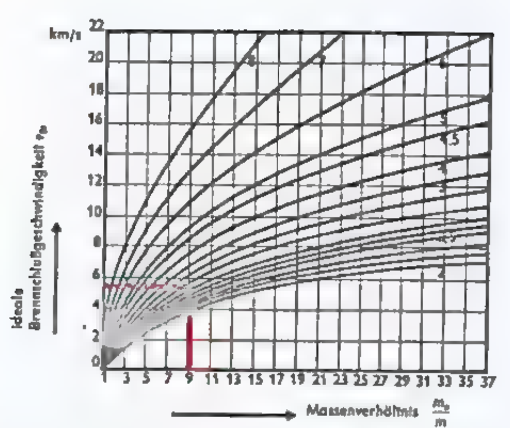


Abb. 3 Zusammenhang zwischen Massenverhältnis $\frac{m_0}{m}$, Ausströmungsgeschwindigkeit c und idealer Brennschlußgeschwindigkeit v_B

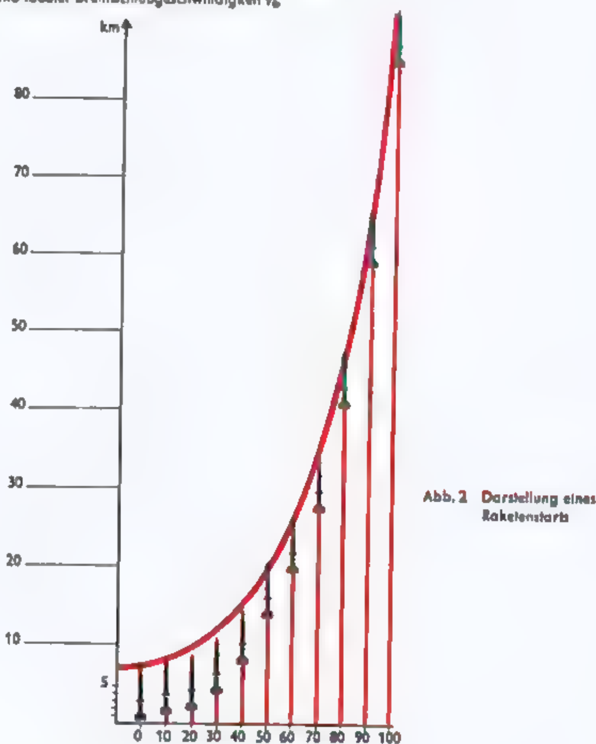


Abb. 2 Darstellung eines Raketenstarts

Wie unter Raketengrundgleichung auf S. 616 gezeigt wurde, hängt die Brennschlußgeschwindigkeit vor allem von Ausströmgeschwindigkeit und dem Massenverhältnis ab. Um ein ausreichendes Antriebsvermögen für einen Weltraumstart zu erhalten, müssen also entweder Ausströmgeschwindigkeit oder Massenverhältnis oder auch beide gemeinsam hohe Werte annehmen. Die Ausströmgeschwindigkeit ist begrenzt von Höhe der Temperatur, die Brennkammer- und Düsenwände aushalten können; das Massenverhältnis $\frac{m_0}{m}$ kann auch nicht beliebig groß gemacht werden, da die Leermasse (Tanks, der Raketenkörper, Brennkammer, Düse, Apparaturen) in der Brennschlußmasse m mit enthalten ist. Bei einstufigem Raketenaufbau würde man deshalb wegen des notwendigen Aufwands an Leermasse erst gar nicht die erforderliche Endgeschwindigkeit erreichen oder aber man würde mit einem sehr schlechten Wirkungsgrad η arbeiten ($\eta = \frac{m v_B^2}{(m_0 - m) \cdot c^2}$). Einstufig bedeutet dabei, daß der Antrieb der Rakete von einer einzigen stetig verlaufenden Brennperiode erfolgt.

Eine vertretbare Lösung ergibt sich bei Anwendung des Stufenprinzips. Dieses arbeitet mit der Aufteilung des Antriebssystems auf mehrere Stufen, die jede als selbständige, einstufige Rakete aufgefaßt werden können. Die ständige Abnahme der Treibstoffmasse wird hierbei von einer stufenweisen Minderung der Leermasse begleitet, da nach Ausbrennen der einzelnen Stufen diese jeweils abgeworfen werden. Dadurch entfällt bei Zündung der letzten Stufe die Notwendigkeit, einen großen Teil der nutzlos gewordenen Startleermasse mitzubeschleunigen. Mit der Stufenteilung läßt sich also eine höhere Endgeschwindigkeit erreichen oder aber bei fest vorgegebener Endgeschwindigkeit sehr viel mehr Nutzmasse als mit einstufigen Raketen transportieren.

Nach der Raketengrundgleichung $v_B = c \cdot \ln\left(\frac{m_0}{m}\right)$ ergibt sich z. B. für eine zweistufige Rakete unter Annahme gleicher Ausströmgeschwindigkeiten als Geschwindigkeit nach Brennschluß der ersten Stufe:

$$v_1 = c \cdot \ln \frac{m_{T1} + m_{R1} + m_{T2} + m_{R2}}{m_{R1} + m_{T2} + m_{R2}}$$

(m_{T1} = Treibstoffmasse der 1. Stufe, m_{T2} = Treibstoffmasse der zweiten Stufe; m_{R1} = Raketenmasse [ohne Treibstoff und Nutzlast] der 1. Stufe; m_{R2} = Raketenmasse [ohne Treibstoff und Nutzlast m_N] der zweiten Stufe). Geschwindigkeitszuwachs der zweiten Stufe:

$$v_2 = c \cdot \ln \frac{m_{T2} + m_{R2}}{m_{R2}}$$

Da nun die zweite Stufe bei ihrer Zündung bereits die Anfangsgeschwindigkeit v_1 besaß, ist ihre Brennschlußgeschwindigkeit $v_B = v_1 + v_2$ und, da $c_1 = c_2$ angenommen wurde,

$$v_B = c \cdot \ln \frac{(m_{T1} + m_{R1} + m_{T2} + m_{R2})\,(m_{T2} + m_{R2})}{(m_{R1} + m_{T2} + m_{R2}) \cdot m_{R2}}$$

Das gesamte Massenverhältnis ist hier das Produkt aus den einzelnen Massenverhältnissen, und die erreichte Geschwindigkeit ist die Summe der einzelnen Geschwindigkeitsbeträge.

Wie Abb. 2 zeigt, gibt es grundsätzlich fünf verschiedene Konzeptionen für Mehrstufenraketen. Die bekannteste und bisher am meisten angewandte ist die Tandem- oder Serienstufung (Abb. 2a). Hier werden die Stufen in Serie übereinandergesetzt und in der vorgegebenen Reihenfolge von unten nach oben gezündet und getrennt. Diese Methode erlaubt die Kombination verschiedener Bauarten und Antriebssysteme der einzelnen Stufen. Bei den Erststufen der

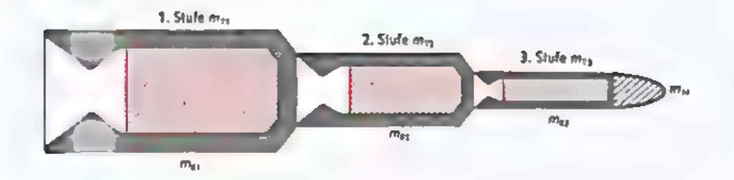


Abb. 1 Schema einer Dreistufenrakete

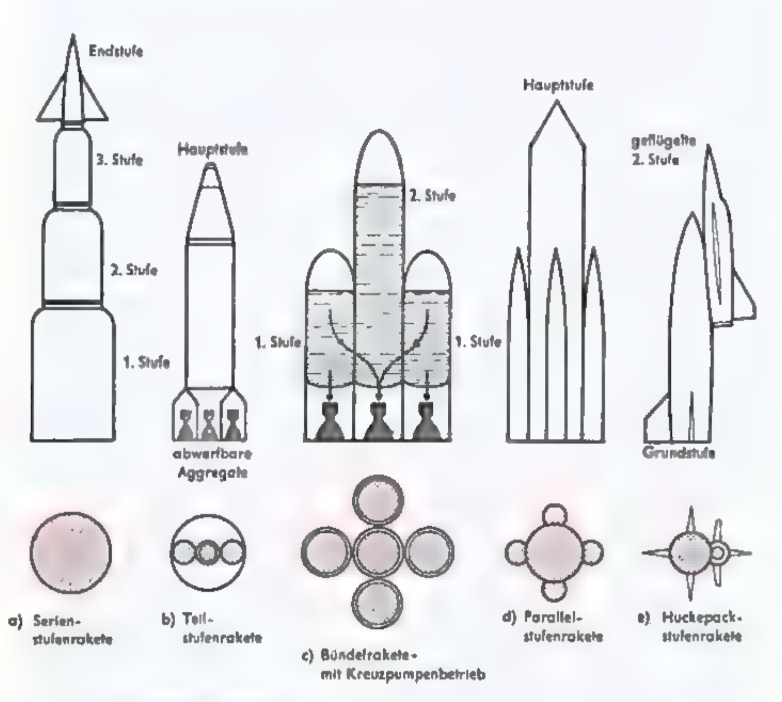


Abb. 2 Mehrstufenraketensysteme

MEHRSTUFENRAKETEN II

Serienstufenraketen ist ein guter Strukturfaktor (Verhältnis von Leermasse zu Startmasse der Einzelstufe) nicht unbedingt erforderlich, da die Endgeschwindigkeit beim Abwerfen der Erststufe bestimmt wird durch das Massenverhältnis (Leermasse der Erststufe plus Masse aller Oberstufen dividiert durch Startmasse des Gesamtsystems). Die Serienstufung hat den Nachteil, daß die Triebwerke der einzelnen Stufen nacheinander brennen und somit die Rakete nicht gleichzeitig beschleunigen können. Diesen Nachteil umgeht man bei Einsatz von Teilstufenraketen. Wie in Abb. 2b schematisch aufgezeigt wird, sind an der scheinbar einzigen Stufe drei Triebwerke angebracht, von denen die beiden äußeren nach Erreichen einer bestimmten Geschwindigkeit abgeworfen werden.

Da bei turbopumpengeförderten Flüssigkeitsraketenantrieben das Triebwerksystem einen wesentlichen Anteil am Gesamtleergewicht der Rakete hat, bringt dies einen bedeutenden Vorteil gegenüber in Serie geschalteten Mehrstufenraketen. Beim Kreuzpumpenbetrieb (Abb. 2c) sind ein oder mehrere Triebwerke zunächst mit den seitlich angeordneten Tanksystemen verbunden, die nach Verbrauch ihrer Treibstoffe abgeworfen werden. Diese Konstruktion bildet den Übergang zur echten Parallelstufenrakete (Abb. 2d), die sich insbesondere dort eignet, wo eine große Hauptstufe von parallel geschalteten Feststoffstarttriebwerken beschleunigt werden soll. Da während der Startphase alle verfügbaren Triebwerke arbeiten, ist die Anfangsbeschleunigung relativ hoch, und die Endbeschleunigung kurz vor Brennschluß der Hauptstufe nimmt keine unerträglichen Werte an, Huckepackraketen (Abb. 2e) werden für den Start von halbballistischen Raumflugsystemen (z. B. Raumtransporter) entwickelt.

Die Stufentrennung ist ein besonderes technisches Problem, das im allgemeinen durch ein automatisches Programm gesteuert wird. Seine Auslösung erfolgt jeweils bei Brennschluß der einzelnen Stufen. Mittels Sprengbolzen oder Sprengschnüren werden die Stufen voneinander getrennt. Dabei ist besonders wichtig, daß an allen Verbindungsstellen gleichzeitig getrennt wird und die Zündung der nächstfolgenden Stufe nicht sofort, sondern einige Sekunden nach der Abtrennung der ausgebrannten Stufe erfolgt. Parallelstufen werden durch kleine Querschubraketen vom Hauptkörper abgestoßen.

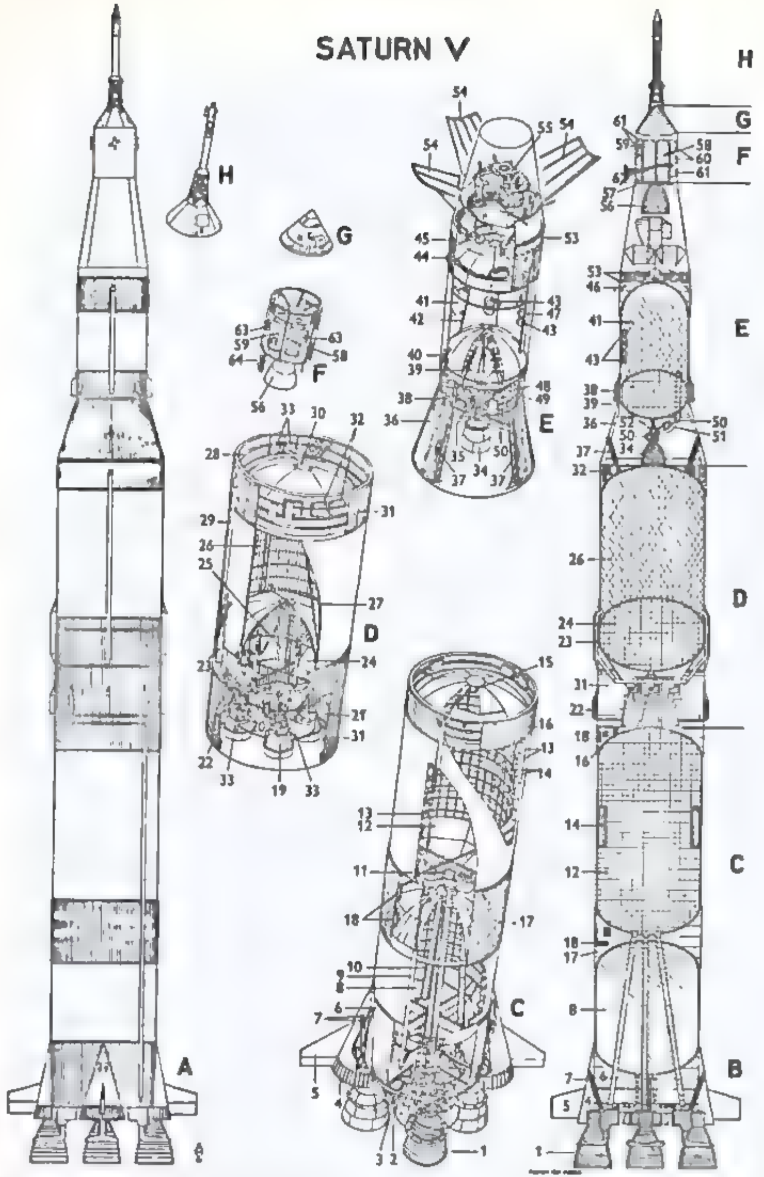


Abb. (schematisch) einer Mehrstufenrakete (Saturn V, Apollo-Raumkabine und LM) A Saturn V (Apollo), Gesamtansicht; B Saturn V (Apollo), Gesamtschnitt; C Saturn V, 1. Stufe, S-I C: 1 F-1-Triebwerk (5×686 Mp Schub), 2 Triebwerkwiderlager und Schubgerüst, 3 Wärmeschutzschild, 4 aerodynam. Triebwerksverkleidung, 5 aerodynam. Stabilisierungsflossen, 6 zylindr. Heckverkleidung, 7 Stufentrenn-Retroraketen (8 Raketen zu 4 Paaren), 8 Kerosin-(RP-1-) Tank (811 000 l), 9 Kabelschacht, 10 Flüssigsauerstoff-Förderleitungen (insgesamt 5), 11 Antivortexsystem (Vorrichtung zur Verhinderung einer Wirbelbildung im Treibstoff), 12 Flüssigsauerstofftank (1 315 000 l), 13 Schwappdämpfung, 14 Druckflaschen für Helium, 15 Diffusor für gasförmigen Sauerstoff, 16 vordere Verkleidung (Zwischenring), 17 Tankzwischenstück, 18 Instrumente und Systemüberwachung; D Saturn V, 2. Stufe, S-II: 19 J-2-Triebwerke (5×94 Mp Schub), 20 Wärmeschutzschild, 21 Triebwerkswiderlager und Schubgerüst, 22 Beschleunigungsraketen zum Treibstoffsammeln, 23 Flüssigwasserstoff-Saugleitung, 24 Flüssigsauerstofftank (330 000 l), 25 Standrohr, 26 Flüssigwasserstofftank (1 020 00 l), 27 Treibstoffstandsensor, 28 Arbeitsbühne, 29 Kabelschacht, 30 Mannloch, 31 S-IC/S-II-Zwischenzelle, 32 Instrumente und Systemüberwachung, 33 Druckgasbehälter; E Saturn V, 3. Stufe, S-IVB: 34 J-2-Triebwerk (94 Mp Schub), 35 Schubkonus, 36 S-II/S-IVB-Zwischenzelle, 37 4 Stufentrenn-Retroraketen für S-II, 38 Lageregelungsraketen (2×3×67 kp Schub), 39 Flüssigsauerstofftank (77 200 l), 40 Leitungsschacht, 41 Flüssigwasserstofftank (253 000 l), 42 Meßsonden, 43 Helium-Druckgastanks, 44 Tankentlüftung, 45 vorderer Zellenring, 46 Arbeitsbühne, 47 Kabelschacht, 48 2 Beschleunigungsraketen zur Treibstoffsammlung, 49 hinterer Zellenring, 50 Helium-Druckgastanks, 51 Flüssigwasserstoffleitung, 52 Flüssigsauerstoffleitung, 53 Instrumenten-Einheit mit 24 Paneelen, 54 LM-Hangar, 55 LM (Mondlandeeinheit); F Apollo-SM (Versorgungs- und Geräte-Baugruppe): 56 SM-Haupttriebwerk (10 Mp Schub), 57 Schubgerüst, 58 Treibstofftank, 59 Stickstofftetroxidtank, 60 Druckgasfördersystem, 61 Sauerstofftanks, 62 Brennstoffzellen, 63 Steuerraketengruppen (4×4×45 kp Schub), 64 Richtantennengruppe; G Raumkapsel (Kommandoteil); H Rettungsturm für Startphase

RAKETENANTRIEBE (ALLGEMEIN)

In den Raketentriebwerken wird durch innere Umsetzung der Bindungsenergie des Arbeitsmittels (chemische Reaktion) oder durch Energiezufuhr von außen (physikalische Reaktion) ungerichtete kinetische Energie (Bewegungsenergie) erzeugt und in einem zweiten Prozeß z. B. in Düsen oder elektrischen Beschleunigerfeldern in gerichtete Strömungsenergie umgewandelt, die nach dem Gesetz von Aktion und Reaktion den entgegengesetzten Vortrieb bewirkt. Entsprechend den ablaufenden Reaktionen unterscheidet man chemische und physikalische Raketenantriebssysteme, entsprechend ihrer Funktionsweise thermischen Antrieb (Ausströmen heißer Gasmassen), Ionenantrieb (Beschleunigung von Ionen mittels elektrischer Felder) und Photonenantrieb (Rückstoß durch Lichtstrahl).

Praktisch verwirklicht sind bisher nur die thermischen (chemothermischen) Antriebe, die auf den klassischen Gasgesetzen beruhen. Der Ionenantrieb befindet sich in der Entwicklung. Mit Photonenantrieb beschleunigte Raketen sind vorerst noch reine Theorie. Die konstruktiven Kennzeichen der thermischen Raketentriebwerke lassen sich auf die Charakteristika der nebenstehenden Übersicht zurückführen.

Grundsätzliche spezifische Kriterien und deren Qualität charakterisierende Forderungen an Raketensysteme sind:

1. ausreichende Beschleunigung b (allgemein kann Beschleunigung als Geschwindigkeitszunahme definiert werden, die ein Körper in einer bestimmten Zeiteinheit erleidet; für die Rakete errechnet sich b aus dem Schub P und der Momentanmasse m_R der Rakete, $b = P/m_R$);
2. hohes Antriebsvermögen (nutzbarer Energievorrat einer Rakete, ausgedrückt in der erreichbaren Maximalgeschwindigkeit [ideale Brennschlußgeschwindigkeit, Endgeschwindigkeit]);
3. guter Nutzmassefaktor (Entwurfsgröße aus dem Verhältnis von Nutzmasse zu Startmasse);
4. hohe Funktionssicherheit.

Die Erfüllung dieser Forderungen hängt vor allem von den zur Verfügung stehenden Triebwerkssystemen ab. So erfüllen zwar die derzeit verwendeten chemothermischen Triebwerke die Forderungen 1 und 4, doch ist das Antriebsvermögen so unzureichend, daß zur Erreichung der erforderlichen hohen Leistung auf den technischen Ausweg der Stufenrakete zurückgegriffen werden mußte.

Raketen	Art der Stoffe	schematischer Aufbau	Treibstoffsysteme	Ausströmgeschwindigkeit
chemothermische Raketen	fest	Stirnbrenner	doppelbasische Treibstoffe zusammengesetzte Treibstoffe	bis 3000 m/s
		Allseitebrenner		
		Sterninnenbrenner		
		Quellinnenbrenner (niedriger Schub, hoher Schub)		
	Gel	Segment-Innenbrenner	zusammengesetzte Treibstoffe	4000 m/s
	fest-flüssig (hybrid)	Hybrid-Innenbrenner (Feststoff, flüssiger Sauerstoffträger)	sauerstoffarmer Treibstoff + O_2, HNO_3, H_2O_2	3500 m/s
	flüssig	Monergolsystem (Sauerstoffträger und Brennstoff)	CH_3NO_3	3000 m/s
		Katergolsystem (kaltes Raketentriebwerk (H_2O_2-Zersetzung), Katalysator, H_2O_2)	H_2O_2 + Kaliumpermanganat	
	flüssig-flüssig	Druckgas-Diergol-System (Platzmembrane, Sauerstoffträger, Platzmembrane, Brennstoff, Drucktanks)	Treibstoff: Sauerstoff, Reaktionsstoffe O_2, F_2, HNO_3	bis 4500 m/s
		Pumpen-Diergol-System (Turbopumpen und Druckgaserzeuger, Sauerstoffträger, Brennstoff)	Treibstoff: Kerosin, Hydrazin, Wasserstoff	
	flüssig-flüssig-flüssig	Druckgas-Triergol-System (a, b, c)	a Sauerstoffträger, b Brennstoff, c Arbeitsmittel	3500 m/s
elektrothermische Raketen	elektr. Energie (Kernenergie) + flüssig	elektrothermisches System mit Arbeitsmedium (flüssiges Arbeitsmittel, elektrische Energiequelle)	sauerstoffarmer Treibstoff + O_2, HNO_3, H_2O_2	10000–20000 m/s
nuklearthermische Raketen	Kernenergie + flüssig	nuklearthermisches System mit Arbeitsmedium (Kernreaktor, flüssiges Arbeitsmittel, Turbopumpe und Druckgasgenerator)	Arbeitsmittel: Wasserstoff, Ammoniak, Wasser	7000–30000 m/s

N = Nutzmasseraum; Instrumenten- und Geräteausrüstung; Flüssigtreibstoff-Raketentriebwerk; Feststoffraketentriebwerk; Druckgasfördersystem; Turbopumpenfördersystem; Struktur

FESTSTOFFRAKETEN

Feststoffraketen weisen einen konstruktiv einfachen Aufbau auf. Sie bestehen im wesentlichen aus Gehäuse, Treibsatz (Treibstoffladung) und Düse. Schematisch gesehen (s. Abb. 1) ist die Brennkammer ein Zylinder, der an der einen Seite verschlossen, an der anderen von der Düse begrenzt wird. Die Fördersysteme wie bei der Flüssigkeitsrakete entfallen also. Die Brennkammerwandung ist aus Metall (Stahl, Titan) oder glasfaserverstärkten Epoxid- oder Phenolharzen hergestellt; bei Brennkammerwandung aus Metall wird diese zusätzlich mit Schichten aus glasfaserverstärkten Epoxid- oder Phenolharzen überzogen.
Innig vermischt wird der Treibstoff (Oxydator und polymerisierbarer Kunststoff) häufig direkt in das Brennkammergehäuse gegossen, in das zuvor ein Formkern gestellt wurde. Nach der Aushärtung wird der Formkern entfernt und in die Einfüllöffnung die Düse eingesetzt. Dort, wo der Formkern stand, befindet sich dann ein Hohlraum. Wird die Raktete gezündet, so brennt sie ausgehend von diesem Hohlraum von innen nach außen ab.
Das Flugprogramm, eine Zusammenfassung aller Bewegungs-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvoraussetzungen, die der Durchführung einer Flugmission zugrunde liegen, erfordert vielfach sehr unterschiedliche Schubwerke. Diese hängen vom Produkt aus Gasmassendurchsatz und Ausströmgeschwindigkeit ab, die ihrerseits von der Gasentwicklung beim Treibstoffabbrand abhängig sind. Der Treibstoffabbrand erfolgt an der freien (nicht abgedeckten) Oberfläche des Treibsatzes. Durch entsprechende Gestaltung der Treibsatzoberfläche (Treibsatzgeometrie, s. Abb. 3) und/oder Teilabdeckung mit Hemmstoffen kann der Schub soweit beeinflußt werden, daß ganze Schubprogramme (Bestimmung des zeitlichen Ablaufs der Schubentwicklung) gestaltet werden können. Große Triebwerke mit relativ kurzer Brennzeit werden meist als Röhren- oder Stirnbrenner ausgebildet, wodurch konstanter Schubverlauf gewährleistet ist. Kleine Triebwerke mit langen Brennzeiten, wie sie zum Beispiel als Marschtriebwerke für Flugabwehrraketen verwendet werden, besitzen Stirnbrenner oder Kombinationen von Röhren- und Stirnbrennern, wodurch sich während des Starts ein hohes Schubniveau (Beschleunigungsphase) und während des Fluges (Marschphase) ein niedriges Schubniveau einstellt. Eine Schubniveausteigerung ist durch Allseitsbrenner möglich, da hierbei die Abbrandoberfläche gegenüber anderen Formen mehr als verdoppelt wird.
Das Feststofftriebwerk, bei dem Brennkammer und Treibstofflagerung identisch sind, gestattet nicht, das ganze Triebwerk zur willkürlichen Änderung der Schubrichtung zwecks Steuerung und Lagestabilisierung heranzuziehen. Die Strahlablenkung geschieht deshalb vor allem mittels schwenkbarer Düsen oder hitzebeständiger beweglicher Teile am Düsenende (z. B. durch Strahlklappen, Strahlruder), neuerdings auch durch Einspritzen von flüssigen oder gasförmigen Stoffen (z. B. Stickstofftetroxid) an 4 um 90° versetzten Stellen direkt hinter dem Düsenhals. Exakter Brennschluß wird durch Öffnen von am Brennkammerkopf angebrachten Brennschlußventilen gewährleistet. Durch das Öffnen der Ventile wird nämlich der für die Aufrechterhaltung der Verbrennung notwendige Brennkammerdruck schlagartig abgebaut. Nach Schließen der Ventile ist dann ein Wiederzünden des Triebwerks durch Einspritzen hypergoler (bei Zusammentreffen beider Komponenten selbstzündender) Substanzen (z. B. Salpetersäure/Dimethylhydrazin) möglich.
Die Hitzeeinwirkung auf die Brennkammerwände wird durch den noch nicht verbrannten Treibstoff, der einen Wärmeisolator darstellt, gemindert. Die Standfestigkeit des Düsenhalsmaterials gegen Temperatur und Erosion wird durch Verwendung von graphitbeschichteten Wolframdüsen für die Brenndauer gewährleistet. Je nach Verwendungszweck beträgt die Brennzeit zwischen einigen Sekunden und einigen Minuten.

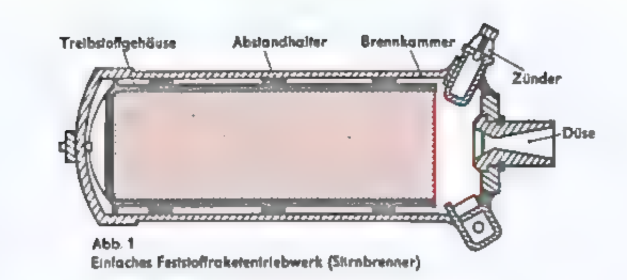


Abb. 1
Einfaches Feststoffraketentriebwerk (Stirnbrenner)



Abb. 2
Modernes Feststoff-Großraketentriebwerk

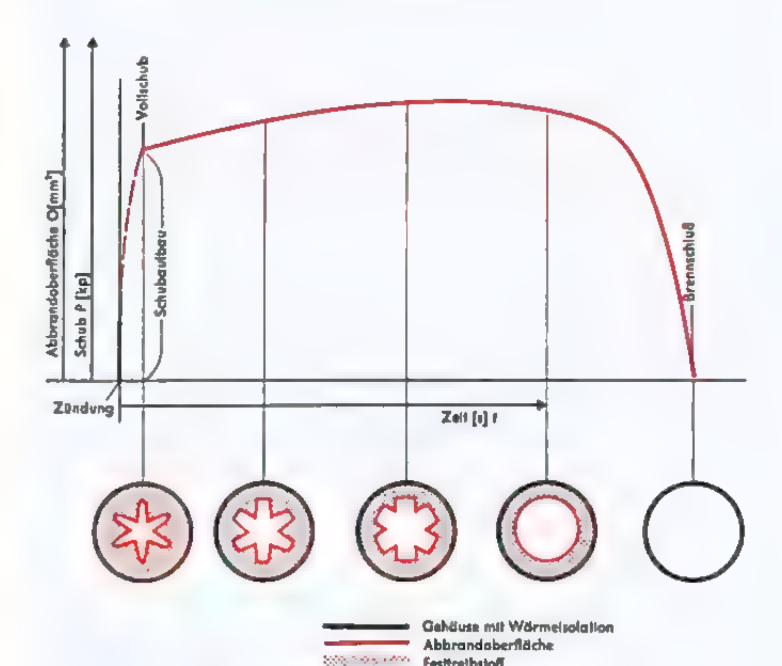


Abb. 3
Schubcharakteristik eines Festtreibstoff-Sterninnenbrenners

FLÜSSIGKEITSRAKETEN

Flüssigkeitsraketen setzen sich zusammen aus der Zelle (Raketenkörper), die die Treibstoffbehälter, Energieversorgungsanlagen, Steuereinrichtungen u.a.m. enthält, sowie dem Antriebsteil, bestehend aus dem eigentlichen Triebwerk (Brennkammer, Einspritzvorrichtung, Kühlsystem, Entspannungsdüse) und dem Triebwerkszubehör (Treibstofffördereinrichtung, Leitungen, Ventile). Abbildung 1 zeigt schematisch die Wirkungsweise einer Flüssigkeitsrakete. Der in getrennten Behältern untergebrachte Treibstoff (Brennstoff und Oxydator) wird durch Druckgas oder Pumpanlagen in die Brennkammer transportiert. Beim druckgasgeförderten Raketensystem hält man mit dem Gas die Tanks unter Innendruck. Das Gas (Helium und Stickstoff) kann in eigenen Behältern unter einem Speicherdruck bis zu 200 at mitgeführt werden (s. Abb. 2) oder es kann durch Verdampfen des Treibstoffs selbst entstehen. Da man aber eine stetige Förderleistung und den damit zusammenhängenden beständigen Verbrennungsvorgang benötigt, wird doch vielfach noch die Pumpenförderung verwandt. Die Pumpen werden von einem Gasgenerator über eine Gasturbine angetrieben. Der Gasgenerator kann entweder das Gas durch katalytische Zersetzung von Wasserstoff mittels Kaliumpermanganat erzeugen, oder aber er verbrennt die beiden Treibstoffkomponenten, wobei man allerdings die Generatoren mit großem Brennstoffüberschuß zur Verringerung der Verbrennungstemperatur speist, da die Gastemperatur über 3000° C liegen kann und bekannte Turbinenwerkstoffe kaum über 1000° C vertragen. Bei den vielfach eingesetzten Turbopumpen handelt es sich im allgemeinen um Zentrifugalpumpen ein- oder mehrstufiger Bauart, für die Förderung von flüssigem Wasserstoff auch um Axialpumpen. Die schwierigsten Probleme, vor allem bei sehr großen Flüssigkeitsraketentriebwerken und Triebwerken mit während des Fluges veränderlichem Schub, stellt das Einspritzsystem, da sowohl der Verbrennungswirkungsgrad als auch die Verbrennungsschwingungen von der Art der Einspritzung abhängig sind. Ein Einspritzsystem besteht hauptsächlich aus dem Verteiler (Verteilung des Treibstoffs auf die einzelnen Düsen) aus dem Einspritzkopf (enthält die Düse) und den Einspritzdüsen selbst.

Aufgrund der hohen Brennkammertemperaturen (2000 bis 3000° C) ist die meist zylindrisch ausgeführte Brennkammer großer Triebwerke fast ausschließlich aus längslaufenden Kühlröhrchen, durch die der Brennstoff vor der Einspritzung zwecks Kühlung der Brennkammerwände geleitet wird, hergestellt (Prinzip der Regenerativkühlung). Bei Brennkammern anderer, vor allem kleinerer Triebwerke kann auch Strahlungskühlung angewandt werden, bei der die auf die Brennkammerwände übergehende Wärme als Temperaturstrahlung abgegeben wird (setzt Hochtemperaturwerkstoffe wie Molybdän und Wolfram voraus). Außerdem werden noch Schleierkühlung (vom Einspritzkopf her wird der wandnahe Bereich mit Brennstoffüberschuß versehen), Schwitzkühlung (sich ständig erneuernder Flüssigkeitsfilm auf der Brennkammerwand, der durch Verdampfen kühlt) und Abschmelzkühlung (Kühlung durch Abschmelzen schlecht wärmeleitender Stoffe, z. B. Graphit) eingesetzt.

Flüssigkeitsraketen bieten die Möglichkeit, den Schub durch Drosselung der Treibstoffzufuhr zu regeln und die Rakete nach Brennschluß erneut zu zünden. Die Triebwerke sind schwenkbar angebracht und so zur Lage- und Kursstabilisierung durch Änderung der Schubrichtung verwendbar. Nachteilig ist die Handhabung flüssiger Treibstoffe (große Tanks, chemische Aggressivität) sowie die Tatsache, daß die Rakete vor dem Start aufgetankt werden muß. Die Ausführung eines Flüssigkeitsraketentriebwerks ist in Abbildung 3 gezeigt.

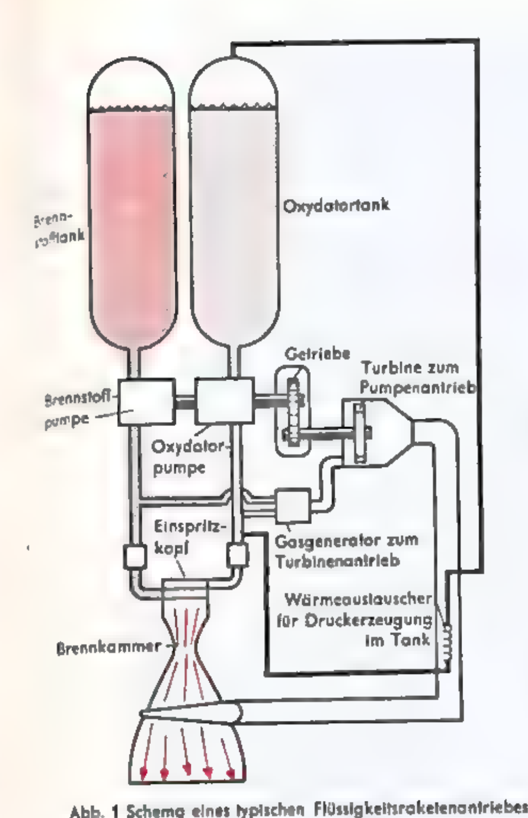


Abb. 1 Schema eines typischen Flüssigkeitsraketenantriebes mit Turbopumpenförderung

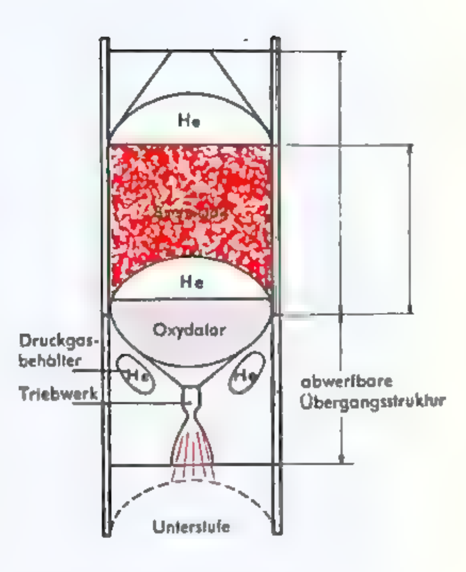


Abb. 2 Typische Anordnung von Tanks, Druckgasbehältern und Triebwerk für eine Oberstufe mit Druckgasförderung

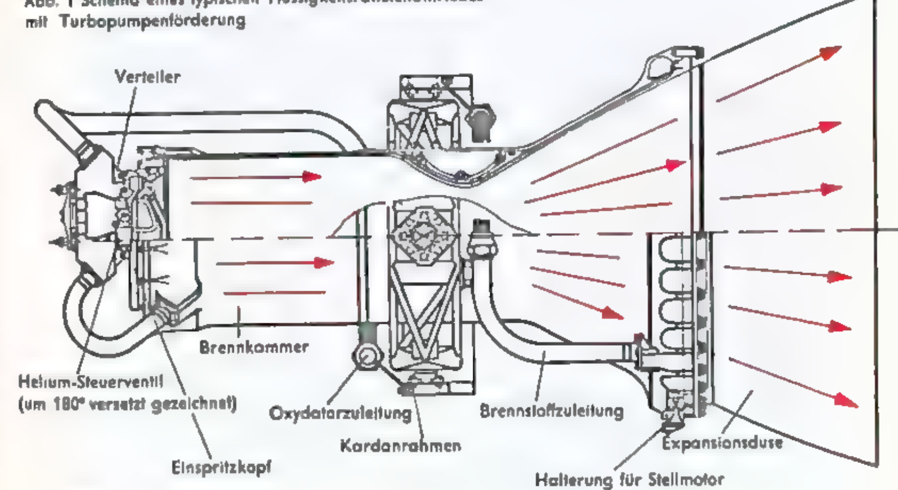


Abb. 3

HYBRIDRAKETEN

Ähnlich wie bei den Feststoffraketen besteht das Triebwerk der Hybridraketen aus einem zylindrischen Behälter, der sowohl den Vorratsbehälter für den festen Treibstoff (meist der Brennstoff) als auch die Brennkammer darstellt. Über der Brennkammer ist der Flüssigkeitstank (für den Oxydator) angeordnet. Die Förderung der Flüssigkeitskomponente erfolgt mit Druckgas, da eine Pumpanlage mit ihrer Aufwendigkeit den einfachen Aufbau stören würde.
Die Einspritzung der flüssigen Komponente erfolgt in den Brennkammerkopf, bei Röhrenbrennern auch über ein axiales Sprührohr am Brennkammerboden, vor dem Düsenhals und zusätzlich in eine Nachbrennkammer. Die Abbildungen 1 bis 3 zeigen schematisch verschiedene konstruktive Varianten. Häufig wird der Flüssigtreibstoff auch zur regenerativen Kühlung von Brennkammer und Düse eingesetzt.
Die Verbrennung setzt vorzugsweise hypergol, das heißt durch Kontakt der beiden Stoffe selbstzündend, ein. Der Feststoffabbrand erfolgt dann proportional der zugeführten Oxydatormenge sowie der zur Verfügung stehenden brennbaren Oberfläche der festen Komponente. Dadurch lassen sich unter anderem explosive Verbrennungsabläufe verhindern, wiederholtes Abschalten und Wiederzünden und eine Feinschubregulierung ermöglichen. Wie bei den Flüssigkeitsraketen läßt sich auch bei Hybridraketen durch Sekundäreinspritzung in die Ausströmdüse die Schubrichtung ändern (s. Abb. 5).
Die Leistungen der Hybridtriebwerke sind größer als die der Feststofftriebwerke und reichen teilweise an die Leistungen von Flüssigkeitstriebwerken heran. Aufgrund ihrer weiteren Vorteile (leichte Schubregelung, einfacher Aufbau) wird den Hybridtriebwerken (Abb. 4) eine gewisse Zukunft vorausgesagt. Da die Ausströmgeschwindigkeit für chemische Treibstoffkombinationen begrenzt ist und die konstruktiven Massenverhältnisse nicht viel weiter als dem heutigen Stand entsprechend vergrößert werden können, wird mit großem Aufwand an der Entwicklung neuer Antriebsarten gearbeitet, die in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

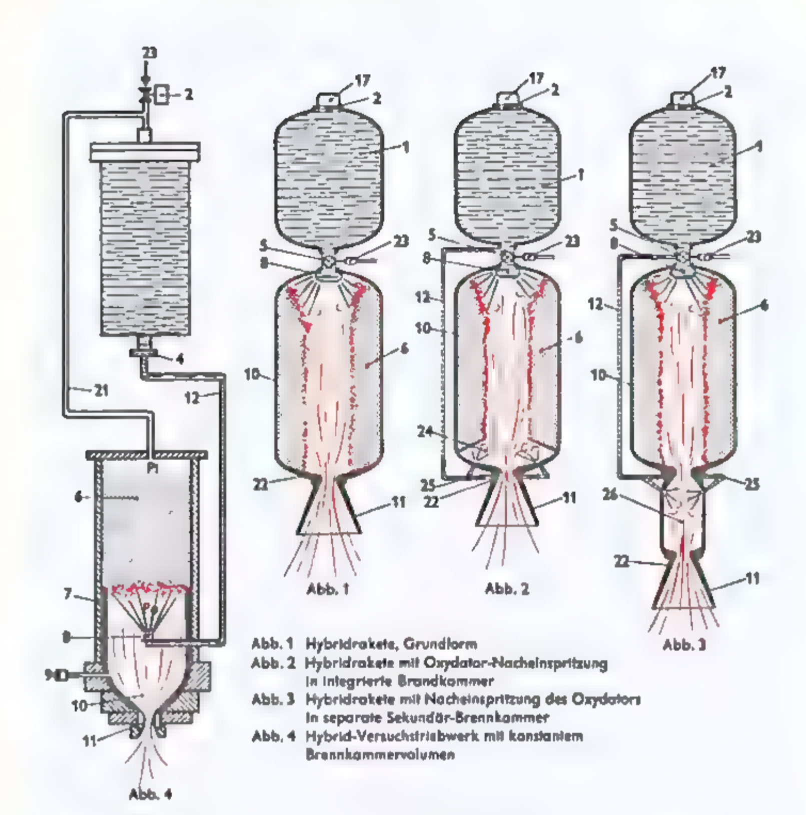


Abb. 1 Hybridrakete, Grundform
Abb. 2 Hybridrakete mit Oxydator-Nacheinspritzung in integrierte Brandkammer
Abb. 3 Hybridrakete mit Nacheinspritzung des Oxydators in separate Sekundär-Brennkammer
Abb. 4 Hybrid-Versuchstriebwerk mit konstantem Brennkammervolumen

Baugruppenschlüssel

1. Oxydatortank
2. Einlaßventil
3. Oxydatoreinlaß
4. Trennmembran
5. Regelventil
6. Brennstoffblock
7. Brennstoffblock-Halterung und Druckschutz
8. Oxydator-Einspritzdüse
9. Druckkontrolle
10. Brennkammer
11. Expansionsdüse
12. Oxydatorleitung
13. Druck- u. Durchfluß-Kontroll-Computer
14. Einspritzverteiler
15. 7 unabhängige Regulierventile
16. Lagerfähiger N_2O_4-Oxydator
17. Druckgasgenerator
18. N_2O_4-Einspritzung zur Schubvektorregelung
19. Nutzmassespitze
20. Bündel von 7 Hybridbrennkammern mit je 1,52 m Durchmesser
21. Druckgasleitung
22. Düsenauskleidung aus Ablativmaterial
23. Einfüll- u. Überdruckventil
24. Integrierte Nachbrennkammer
25. Oxydator-Einspritzdüsen-Ringleitung für Nachverbrennung
26. Separate Nachbrennkammer
27. Verschluß mit Überdruckventil
28. Flüssig-Wasserstoff-Tank (LH)
29. LH-Leitung
30. LH-Einspritzdüsen-Ringleitung für Zweitverbrennung

IONENRAKETEN (ELEKTRISCHE RAKETEN)

Ionenraketen besitzen einen elektrostatischen Antrieb. Hierbei werden die Masseteilchen des Arbeitsmediums durch Kontakt- oder Stoßionisation elektrisch aufgeladen und anschließend einer Beschleunigungskraft in einem elektrostatischen Feld unterworfen (s. Abb. 1). Die beschleunigten Masseteilchen können Atomionen, molekulare Ionen, geladene kolloidale Teilchen oder auch Staubkörnchen bzw. feine Tröpfchen sein. Die Ausströmgeschwindigkeit, die die Teilchen beim Durchlaufen des elektrostatischen Feldes erreichen können, wird bestimmt durch die Beschleunigungsspannung (elektrische Potentialdifferenz über der Kammer) sowie durch Ladung und Masse der einzelnen Partikeln. Typische Ausströmgeschwindigkeiten für Ionenantriebe liegen zwischen 30 und 300 km/s. Da jedoch der Massendurchsatz sehr niedrig bleibt, sind die erzielbaren Schubkräfte kleiner als das Antriebsgewicht. Als Arbeitsmedium (Stützmasse) erweisen sich leicht ionisierbare Metalle wie z. B. Cäsium, Rubidium und Kalium als vorteilhaft, bei Anwendung von Stoßionisation wird vor allem mit Quecksilber gearbeitet.

Bei der Oberflächen- oder Kontaktionisation (s. Abb. 3) besteht das Antriebssystem aus der Primärenergiequelle, die über einen Wärmeaustauscher Wärme an das Arbeitsmedium einer Turbine abgibt. Ein Restwärmeabstrahler sorgt für ein zum Betrieb der Turbine notwendiges Temperaturgefälle. Der mit der Turbine gekoppelte Generator liefert die zur Beschleunigung der Ionen notwendige Spannung direkt an den Linearbeschleuniger. Zur Vorbereitung der Ionisation muß jedoch das aus dem Treibstofftank kommende meist flüssige Arbeitsmedium zunächst verdampft werden (z. B. in einer elektrisch beheizten Kammer). An einem heißen Kontaktgitter werden die Atome des dampfförmigen Arbeitsmediums ionisiert. Im Linearbeschleuniger schließlich wird aus den Ionen ein Treibstrahl großer Geschwindigkeit erzeugt. Eine gleichgroße negative Ladungsmenge wird über einen Heißdrahtemitter schublos abgestoßen. Die entgegengesetzt geladenen Teilchenströme werden sofort nach Verlassen des Triebwerkes vereinigt und neutralisiert. Wenn nicht neutralisiert würde, käme es zum Ionenstau, und das Triebwerk könnte nicht mehr arbeiten.

Mit der Stoßionisation arbeitet das Kaufmann-Prinzip (s. Abb. 2). Es handelt sich um eine weiterentwickelte Elektronenbombardierungsquelle, die einem Magnetron ähnelt. Zusammen mit einem ionenbeschleunigenden Gitter am Austritt der Ionenquelle ergibt sich ein bemerkenswert einfaches und effektives Ionentriebwerk. Die Atome des dampfförmigen Quecksilbers werden in der Ionisationskammer durch Zusammenstöße mit den von einer Kathode emittierten Elektronen ionisiert. Ein Magnetfeld sorgt für eine Trennung der Elektronen von den Ionen, die anschließend im elektrostatischen Feld beschleunigt werden.

Ionenraketen eignen sich wegen ihres niedrigen Schubniveaus und der ausschließlichen Funktion im Vakuum nur für interplanetare oder interstellare Raumfahrt. Die Triebwerke müssen als Teil eines Raumflugsystems mittels chemischer Antriebe in eine Raumflugbahn gebracht werden, ehe sie arbeiten können. Vorteilhaft sind der geringe Massenverbrauch, die geringe Triebwerksbelastung und daraus resultierend die langen Betriebszeiten.

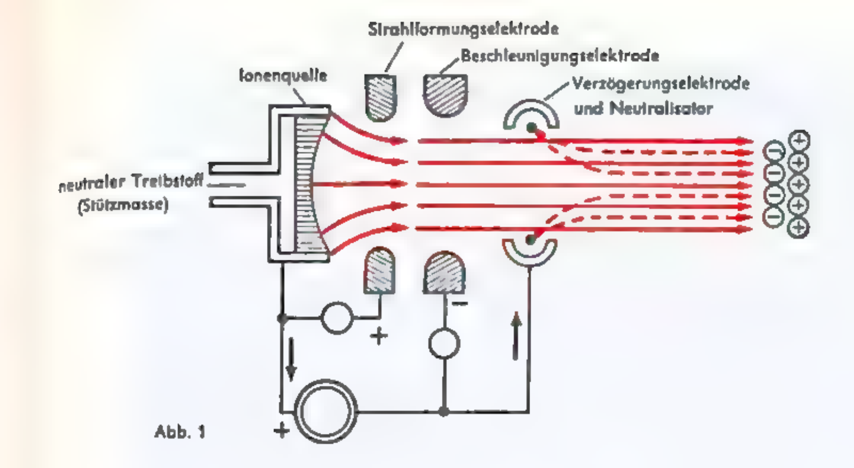


Abb. 1

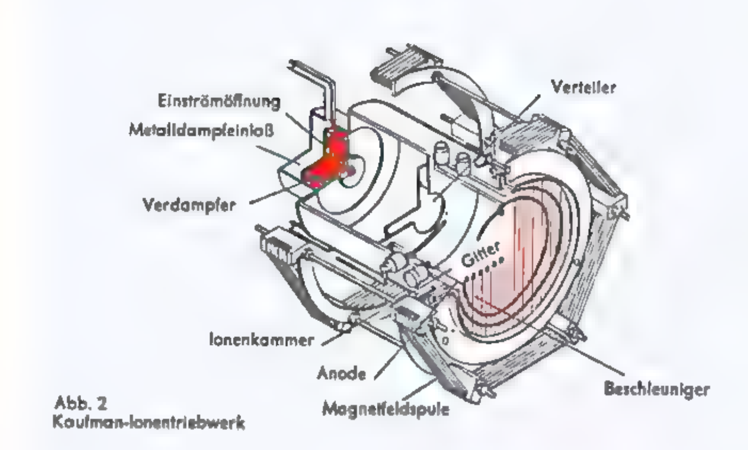


Abb. 2
Kaufman-Ionentriebwerk

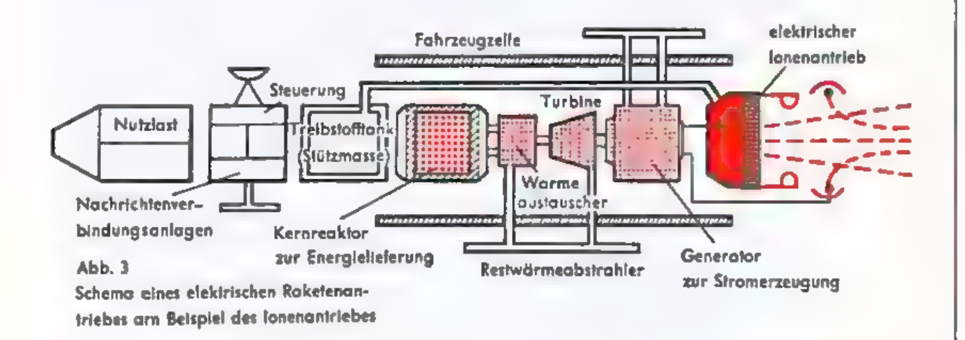


Abb. 3
Schema eines elektrischen Raketenantriebes am Beispiel des Ionenantriebes

KERNENERGIERAKETEN I

Kernenergietriebwerke verwenden die bei der Kernreaktion frei werdende thermische Energie direkt zur Aufheizung des Arbeitsmediums. Es sind also keine zwischengeschalteten Energiewandler notwendig. Zur Energieerzeugung können sowohl Kernspaltungs- als auch Kernfusionsprozesse herangezogen werden. Praktische Möglichkeiten ergeben sich bisher nur für die Spaltungsreaktion, für die eine Vielzahl von Projekten entwickelt worden ist, die sich jedoch alle auf einige wenige Grundformen zurückführen lassen.

Der einfachste direkte Kernenergieantrieb ist der konvektive Fissionsantrieb. Hier wird das Arbeitsmedium (Wasserstoff, Helium, Ammoniak oder Wasser, d. h. ein Stoff mit niedrigem Molekulargewicht) an den heißen Brennelementen (Uran 238 oder Plutonium) des Reaktors erhitzt und daran anschließend in einer Ausströmdüse (Lavaldüse) entspannt. Zur Zeit wird an drei Reaktortypen gearbeitet:

Beim homogen-thermischen Reaktor (Abb. 1) bilden Spalt- und Moderatormaterial eine einzige Phase, d. h., sie bilden eine innige Mischung (eine homogene Mischung). Der die Neutronen abbremsende und somit die Spaltreaktion steuernde Moderator besteht aus Graphit oder Berylliumoxid. Die in dem Moderator unmittelbar frei werdende Reaktionswärme wird von diesem an das Arbeitsmedium abgegeben.

Das spaltbare Material der heterogen-thermischen Reaktoren (Abb. 2) ist vom Moderator durch ein hitzebeständiges Material (z. B. Wolfram, Molybdän, Tantalcarbid) getrennt. Auch hier wird das Arbeitsmedium an der Moderatoroberfläche aufgeheizt.

Die schnellen Reaktoren (Abb. 3) enthalten nur noch spaltbares Material, der Moderator entfällt. Die bei der Kernreaktion entstehende Hitze wird von den Oberflächen mehrerer Platten, die dem Spaltmaterial als Träger dienen, an das Arbeitsmedium übertragen.

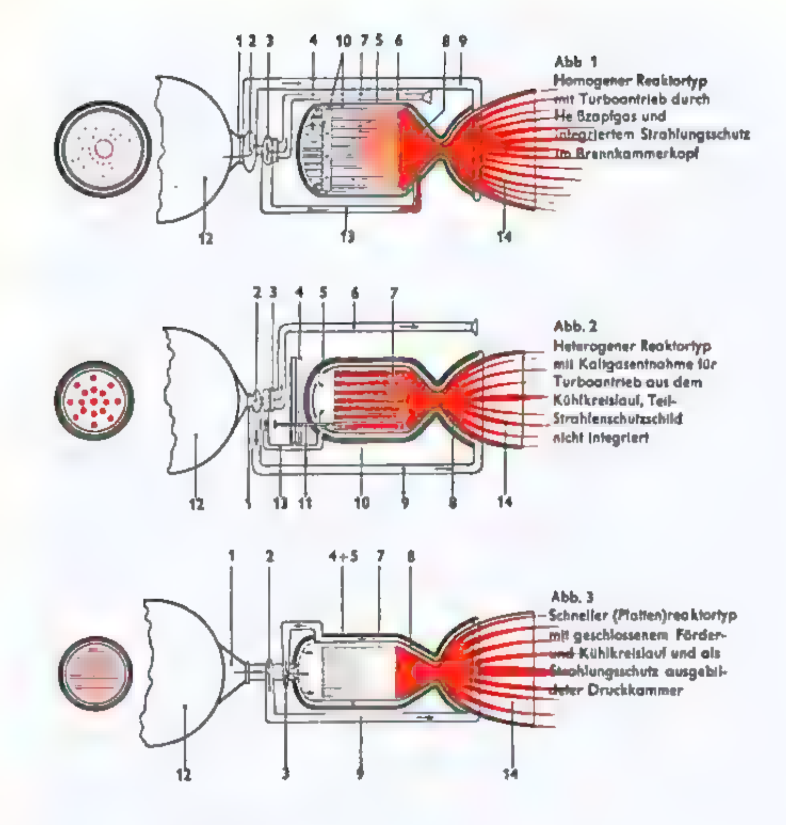


Abb. 1
Homogener Reaktortyp mit Turboantrieb durch Heißzapfgas und integriertem Strahlungsschutz im Brennkammerkopf

Abb. 2
Heterogener Reaktortyp mit Kaltgasentnahme für Turboantrieb aus dem Kühlkreislauf, Teil-Strahlenschutzschild nicht integriert

Abb. 3
Schneller (Platten)reaktortyp mit geschlossenem Förder- und Kühlkreislauf und als Strahlungsschutz ausgebildeter Druckkammer

1 Arbeitsmedium-Zuführung
2 Turbopumpe
3 Gasturbine
4 Strahlungsschutz
5 Druckmantel der Brennkammer
6 Turbinenabgasleitung
7 Reaktorkern (links: Reaktorkern-Querschnitt im proportionalen Durchmesser)
8 Regenerativkühlsystem
9 Zuleitung zum Regenerativkühlsystem
10 Reflektorwandung
11 Reaktionsregelstab
12 Arbeitsmediumtank
13 Zapfgasleitung zur Turbine
14 Expansionsdüsenverlängerung (gekühlt durch Wärmeabstrahlung)

KERNENERGIERAKETEN II

In fast allen Fällen wird das Arbeitsmedium durch Turbopumpen gefördert und zur regenerativen Kühlung von Kammerwand und Düse herangezogen. Trotz Regenerativkühlung aber stößt die Beherrschung der hohen Reaktorwandtemperaturen auf materialtechnische Schwierigkeiten. Um zu höheren Betriebstemperaturen zu gelangen, sind daher Konstruktionen mit flüssigem oder gasförmigem Reaktorkern untersucht worden.
Bei den Gaskernreaktoren (Abb. 5) wird die Wärme, die sich bei der Spaltung des gasförmigen Kernbrennstoffes bildet, zur Erhitzung des gasförmigen Arbeitsmediums durch direkte Mischung verwendet. Das Gemisch dient dann als Antriebsstrahl. Nachteilig ist dabei der Kernbrennstoffausströmverlust. Um diesen klein zu halten, wurden verschiedene Verfahren entwickelt. Im phasenverschobenen Gaskernreaktor (Abb. 4) z. B. wird das Arbeitsmedium (Wasserstoff) mit einer gegenüber dem Spaltstoffgas fünfzigfach höheren Geschwindigkeit der Brennkammer zugeführt. Eine weitere Verbesserung läßt sich mit dem phasenverschobenen Gasmantelreaktor erreichen, in dem die nukleare Gasmasse und das Arbeitsmedium durch einen zylindrischen Wasserstoffmantel voneinander getrennt gehalten werden. Auch die Einschnürung der plasmatischen Gase mit magnetischen Feldern, sogenannten magnetischen Flaschen, wird zur Vermeidung direkter Kontakte mit materiellen Wänden erwogen.
Mit Kernenergieantrieben läßt sich gegenüber chemischen Triebwerken eine wesentliche Erhöhung der Ausströmgeschwindigkeiten erreichen, der dann aber eine sehr geringe Impulsdichte gegenübersteht. Außerdem verhindern die notwendigen Anlagen für den Strahlenschutz ein günstiges Nutzmasseverhältnis.

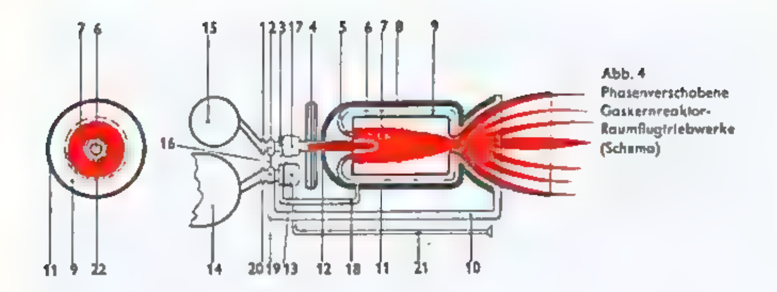


Abb. 4
Phasenverschobene Gaskernreaktor-Raumflugtriebwerke (Schema)

1. Nukleargas-Zuführung
2. Nukleargas-Pumpe
3. Vorerhitzung
4. Strahlungsschutz
5. Arbeitsmedium-Injektion
6. Nukleare Gasreaktion
7. Plasmaflamme
8. Regenerativkühlung
9. Reflektormantel
10. Zuleitung zum Regenerativkühlsystem
11. Druckmantel der Brennkammer
12. Reaktorkopf
13. Gasturbine
14. Arbeitsmediumtank
15. Nukleargastank
16. Pumpenkupplung
17. Dosierventil
18. Zapfgasleitung zur Turbine
19. Arbeitsmediumpumpe
20. Arbeitsmediumzuführung
21. Turbinen-Abgasleitung
22. Wasserstoffgas-Trennschicht

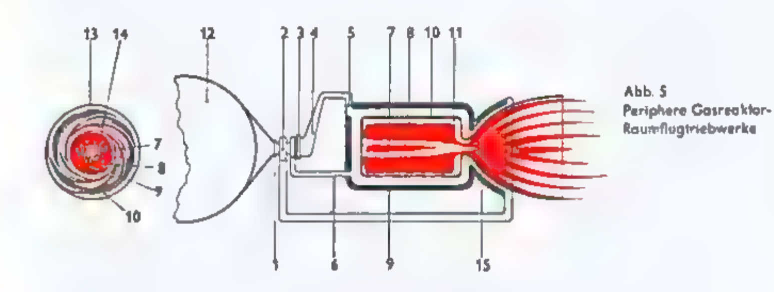


Abb. 5
Periphere Gasreaktor-Raumflugtriebwerke

1. Arbeitsgasmischung
2. Zentrifugalpumpe
3. Gasturbine
4. Turbinenabgasleitung
5. Gasrückführung
6. Zapfgasleitung zur Gasturbine
7. Plasmaflamme
8. kritische Nukleargasmasse
9. Strahlungsschutz-Druckmantel
10. Reflektormantel mit tangentialen Gaskanälen und Teilregenerativkühlung
11. Innere Gasfilmkühlung
12. Arbeitsmittelgemischtank
13. äußerer Gasführungsmantel
14. Wasserstoff-Trennschicht
15. Arbeitsgaszuführung

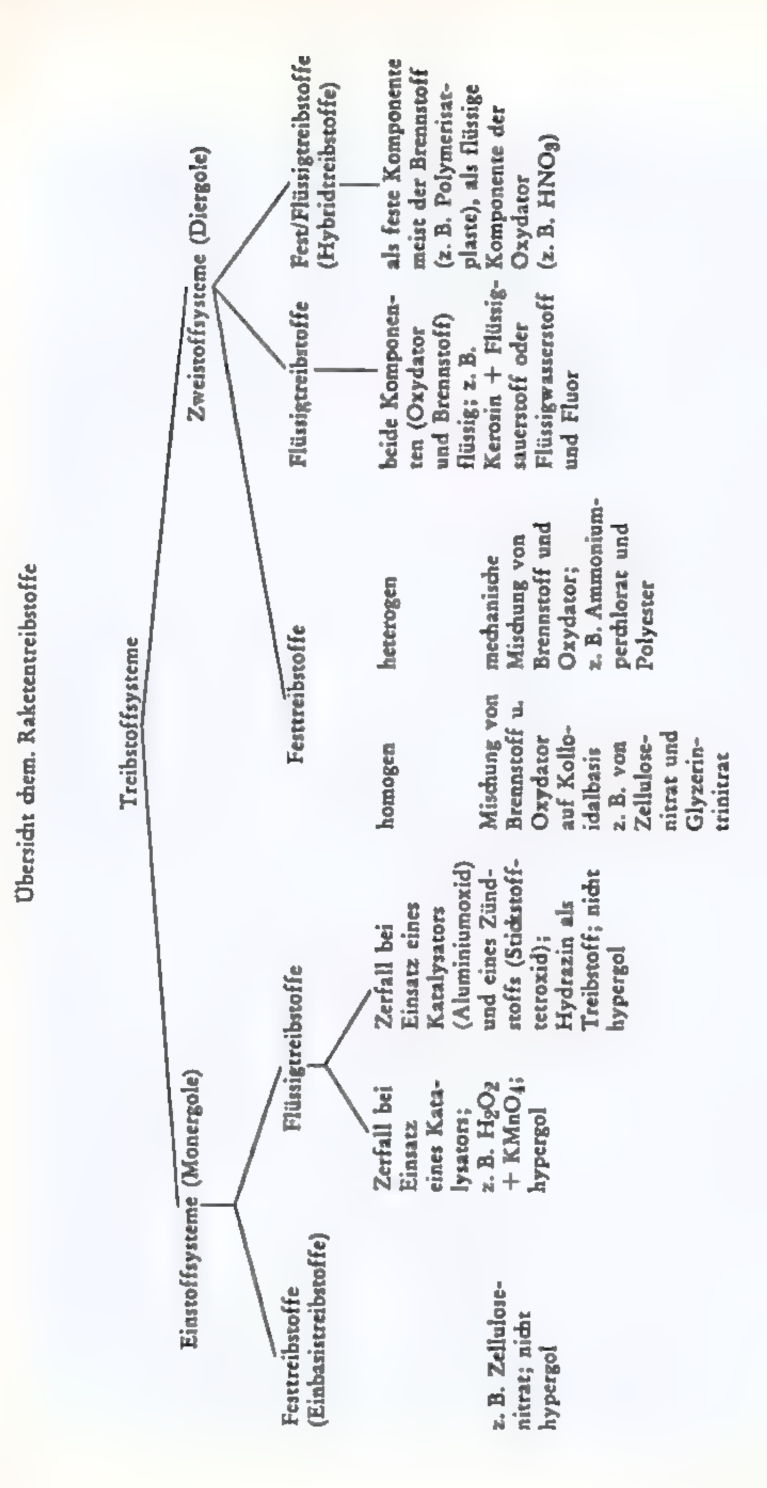
RAKETENTREIBSTOFFE I

Raketentreibstoffe sind chemische Substanzen (Elemente, Verbindungen), die das Arbeitsgas mittels Verbrennungs- oder Zerfallsreaktion liefern und zur Reaktion immer zwei Komponenten benötigen, die Verbrennungstreibstoffe den Brennstoff und den Oxydator (Sauerstoffträger), die Zerfallstreibstoffe neben dem eigentlichen Treibstoff einen Katalysator. Man unterscheidet die Treibstoffe nach ihrem Aggregatzustand in Fest-, Flüssig- und Hybridtreibstoffe oder aber nach der Anzahl der Komponenten, aus denen sie bestehen, in Einstoff (Monergole), Zweistoff- (Diergole) und Dreistoffsysteme (Triergole).

Flüssige Treibstoffe: Kaum verwendet werden Monergole (z. B. Hydrazin, Wasserstoffperoxid), da ihre Handhabung zum einen gefährlich ist (besonders hohe spontane Zerfallsneigung von Wasserstoffperoxid bei geringsten metallischen oder organischen Verunreinigungen), zum anderen einen hohen Aufwand (Hydrazin benötigt neben Aluminiumoxid als Katalysator noch Stickstofftetroxid als Zündstoff) erfordert. So kommen fast ausschließlich Diergole zur Anwendung, d. h., die flüssigen Treibstoffe bestehen vornehmlich aus zwei Flüssigkeiten, dem Brennstoff und dem Oxydator, die in getrennten Tanks aufbewahrt und erst in den Brennkammern zur Reaktion gebracht werden.

Als Oxydatoren kommen in Betracht: 1. flüssiger Sauerstoff (O_2), der gegenwärtig am häufigsten eingesetzte Sauerstoffträger; relativ leicht und durch Luftverflüssigung billig herzustellen; nachteilig die Verdampfungsverluste und Eisabscheidung an Leitungen und Ventilen; wird vor allem zusammen mit Kohlenwasserstoffen (Kerosin) eingesetzt; bildet mit den Brennstoffen nichthypergole Gemische (bei Berührung keine spontane Zündung) und benötigt deshalb eine besondere Zündvorrichtung 2. rotrauchende Salpetersäure (HNO_3) mit einem Sauerstoffgehalt von mehr als 70 % und einem Stickstoffdioxidgehalt von 15 %; raketentechnisch interessante hohe Dichte (führt mit den jeweiligen Brennstoffen zu hoher Impulsdichte); hypergol (spontane Zündung bei Berührung der Komponenten) mit vielen Brennstoffen (z. B. Hydrazin); Zusätze von Flußsäure oder Phosphorsäure verringern die korrosive Wirkung; 3. Stickstofftetroxid (N_2O_4), das verschiedentlich anstelle von Salpetersäure verwendet wird, da es sehr viel weniger aggressiv (keine chemische Reaktion mit metallischen Werkstoffen, z. B. den Behältern, Leitungen) als diese ist; seine industrielle Herstellung ist relativ einfach; 4. flüssiges Ozon (O_3); sehr hohe Dichte und sehr hohe Ausströmgeschwindigkeit; wegen Explosionsneigung in der Anwendung beschränkt; 5. flüssiger Fluor (F_2), der bei Kombination mit wasserstoffreichen Brennstoffen dem flüssigen Sauerstoff in der Leistung überlegen ist; hohe Reaktionsfähigkeit bei guter Lagerfähigkeit; hohe Dichte; Gemische mit flüssigem Sauerstoff (optimal 70 % Fluor, 30 % Sauerstoff) werden bei Wahl von Kohlenwasserstoffen als Brennstoff verwendet; interessant auch in seinen Verbindungen, vor allem im Chlortrifluorid (ClF_3), das eine gleiche gute Reaktionsfähigkeit wie das Fluor selbst besitzt.

Von den flüssigen Brennstoffen haben sich vor allem bewährt: 1. Alkohole (Methyl- oder Äthylalkohole) in Verbindung mit Sauerstoff; werden heute jedoch kaum noch verwendet; 2. Kerosin (Petroleum, ein Kohlenwasserstoff mit 10 bis 16 Atomen); in Verbindung mit flüssigem Sauerstoff für den Antrieb von Startstufen im Einsatz; billig in der Herstellung; 3. Hydrazin (N_2H_4), vor allem in Verbindung mit Flüssigfluor und Fluorverbindung interessant (hoher spezifischer Impuls); wird aber auch mit flüssigem Sauerstoff und Wasserstoffperoxid kombiniert; ist sehr gut lagerfähig, in der Herstellung jedoch relativ teuer; 4 Ammoniak (NH_3), gleichfalls in Verbindung mit Fluor von Interesse; besitzt relativ geringe Dichte; ist billig in der Herstellung; 5. flüssiger Wasserstoff (H_2), der in Verbindung mit flüssigem Sauerstoff oder Fluor eingesetzt wird (extrem hoher spezifischer Impuls); sehr gute Ausströmgeschwindigkeit.



RAKETENTREIBSTOFFE II

Feste Treibstoffe: Man unterscheidet zwei Gruppen von festen Treibstoffen, die sich sowohl in Aufbau und Zusammensetzung als auch in ihrer Herstellung unterscheiden. Die homogenen Treibstoffe (Monergole) enthalten Brennstoff und Oxydator in einer chemischen Verbindung, hauptsächlich Zellulosenitrat und Glyzerintrinitrat mit beigemengtem Stabilisator (dient der Minderung spontaner Zerfallsneigung der Nitratanteile). Die Wirksamkeit dieser Treibstoffe ist begrenzt (Einsatz vornehmlich in Raketenwaffen). Heterogene Treibstoffe (Propergole) bestehen aus einem Gemenge von Brennstoff und Oxydator, das mechanisch hergestellt wird. Als Oxydatoren kommen vor allem Perchlorate und Nitrate in Betracht (z. B. Ammoniumperchlorat, Kaliumnitrat) und als Brennstoffe bevorzugt hochpolymere Kunststoffe (z. B. Polysulfide, Polyurethane). Interessant sind die mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe, die man je nach Notwendigkeit zwischen hart und elastisch variieren kann. Eine Leistungssteigerung (Erhöhung der Verbrennungsenergie) wird durch Mischungszusätze brennbarer Elemente mit niedriger Ordnungszahl erreicht (z. B. Aluminium, Lithium). Nach dem Mischen werden die zähflüssigen, gießbaren Massen in Formen gegossen, in denen sie zu einheitlichen, plastischen Treibsätzen aushärten.
Hybride Treibstoffe: Zusammengesetzt aus je einer festen und einer flüssigen Komponente. Als feste Komponente kommen die oben besprochenen hochpolymeren Kunststoffe in Betracht, als Flüssigkomponente alle unter flüssige Treibstoffe besprochenen Oxydatoren. Aufgrund der leichten Verbrennungssteuerung durch Oxydatorzuflußregelung und damit bewirkter Schubregelung erhält die Hybridgruppe eine zunehmende Bedeutung.
Wichtige Daten zur Leistungscharakterisierung chemischer Raketentreibstoffe sind der spezifische Impuls I_{sp} und die Impulsdichte I_V. Der spezifische Impuls ist allgemein gleich dem Schub P bezogen auf den Treibstoffmassendurchsatz pro Sekunde: $I_{sp} = P/\dot{m}$. Als Impulsdichte bezeichnet man das Produkt aus spezifischem Impuls und Treibstoffdichte (Dichte ist der Quotient aus Masse und Volumen eines Stoffes). Die Impulsdichte läßt erkennen, daß Treibstoffe höherer Dichte (z. B. feste Treibstoffe) solchen mit gleich großem oder größerem spezifischen Impuls (z. B. flüssige Treibstoffe) teilweise überlegen sind, da sich bei gleichem Tankvolumen eine größere Masse unterbringen läßt.

Treibstoffkombinationen

Oxydator	Brennstoff	Mischungsverhältnis	Dichte des Gemisches [g/cm³]	Verbrennungstemperatur [°K]	Spezifischer Impuls [sec] am Boden	Spezifischer Impuls [sec] im Vakuum
Sauerstoff	Kerosin	2,56	1,02	3673	300	348
Sauerstoff	UDMH *	1,67	0,97	3608	310	363
Sauerstoff	Äthylalkohol (75 %)	1,43	1,01	3233	279	324
Salpetersäure (15 % NO_2)	Kerosin	4,80	1,35	3240	268	314
Salpetersäure (15 % NO_2)	UDMH *	3,00	1,25	3250	276	323
Stickstofftetroxid	Hydrazin	1,34	1,22	3215	292	339
Stickstofftetroxid	UDMH *	2,61	1,18	3430	285	333
Sauerstoff	Wasserstoff	4,02	0,28	3573	391	451
Fluor	Kerosin	2,60	1,22	3980	322	380
Fluor	Wasserstoff	7,54	0,45	3863	410	470

* unsymmetrisches Dimethylhydrazin

GRAVITATION

Jeder Körper, im Weltall wie auch auf der Erde unterliegt der Gravitation (Massenanziehung, Schwerkraft), die überall vorhanden ist. Nach dem Stand gegenwärtiger Erkenntnis läßt sich diese Kraft in keiner Weise ausschalten.
Nach Newton ist nun die irdische Gravitation nur der Ausdruck einer allgemeinen Materieeigenschaft, der Massenanziehung. Danach üben zwei Körper (Massen m_1 und m_2) aufeinander Anziehungskräfte aus, die dem Projekt dieser Massen direkt und dem Quadrat ihrer Entfernung r umgekehrt proportional sind: $F = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$. γ ist eine universelle, von der stofflichen Beschaffenheit unabhängige Gravitationskonstante.
Jede Masse übt daher ständig eine Kraft auf jede andere Masse aus und sucht diese anzuziehen, wirkt also auf sie beschleunigend. Diese Kraft wirkt über jede Entfernung im Raum bis ins Unendliche und nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab. Damit wird der Raum zum Träger des sogenannten Gravitationsfeldes (Umgebungseinfluß einer Masse, durch ein Potential darstellbar).
Bezogen auf die Erde als eine der anziehenden Massen ergibt sich, wenn man die Masse im Erdmittelpunkt konzentriert denkt, eine in einem Diagramm (Abb. 1) darstellbare Abnahme der Erdgravitation. Da die Gravitationsrichtung in bezug auf einen Körper grundsätzlich in den Kraftlinien radial gerichtet ist, lassen sich entsprechend der Gravitationsabnahme mit der Entfernung Höhen- oder was das gleiche ist Abstandslinien gleicher Gravitationsstärke ermitteln. Unter der Annahme einer Kugelgestalt der Erde ergeben sich daraus konzentrische Kugelschalen gleicher Gravitationsstärke (Abb. 2).
Zur Bewegung eines Körpers längs der Kraftlinien muß also Energie aufgewandt werden, wenn der Körper entgegengesetzt zur Gravitations-Wirkrichtung bewegt wird. Hierbei wird dem Körper potentielle Energie (Lageenergie) entsprechend dem Produkt aus Masse und Hubhöhe erteilt. Beim Fall in Richtung Massemittelpunkt wird die seiner Höhe entsprechende potentielle Energie in kinetische Energie (Bewegungsenergie) umgewandelt (halbes Produkt aus Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit). Die für einen Raketenstart aufzuwendende Energie ist nun aber ausschließlich von dem Treibstoffanteil der Rakete zu stellen. Um z. B. einen Körper von 1 kg Masse endgültig von der Erdschwerkraft zu befreien, ist eine Energie von 6,38 · 10^6 mkp = 17,4 kWh erforderlich. Unter Berücksichtigung des Luftwiderstandes und anderer Störquellen ergeben sich für den Start sogar noch höhere Werte.
Mit Schwerelosigkeit bezeichnet man einen Zustand, bei dem für einen Körper innerhalb eines Gravitationsfeldes einer Zentralmasse die Gravitationswirkung kompensiert ist. Man unterscheidet dabei eine statische Schwerelosigkeit, wie sie u. a. an den Äquigravisphärepunkten (s. Abb. 3) eines Zweikörpersystems oder an den Librationspunkten (s. Abb. 4) eines drei- oder mehrteiligen Systems auftritt und eine dynamische Schwerelosigkeit, die bei antriebsloser Bewegung auf Keplerschen Bahnen aufgrund des sich einstellenden Gleichgewichts zwischen Gravitation und Fliehkraft (s. Abb. 5) beobachtbar ist.
Durch Rotation von zwei miteinander verbundenen Körpern um einen gemeinsamen Schwerpunkt kann die himmelsmechanisch bedingte Schwerelosigkeit ganz oder zum Teil aufgehoben werden (künstliche Schwerkraft).

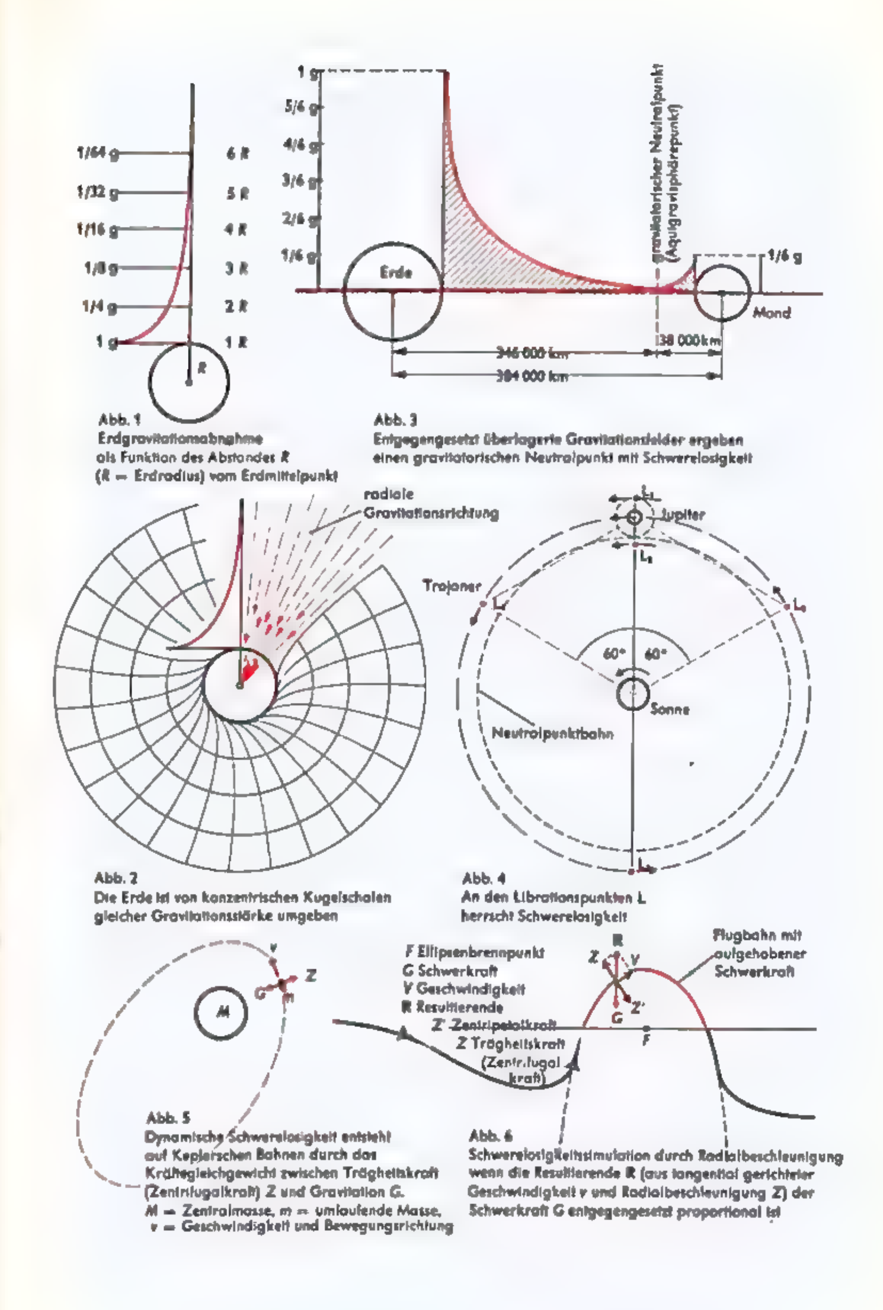


Abb. 1
Erdgravitationsabnahme
als Funktion des Abstandes R
(R = Erdradius) vom Erdmittelpunkt

Abb. 3
Entgegengesetzt überlagerte Gravitationsfelder ergeben einen gravitatorischen Neutralpunkt mit Schwerelosigkeit

Abb. 2
Die Erde ist von konzentrischen Kugelschalen gleicher Gravitationsstärke umgeben

Abb. 4
An den Librationspunkten L herrscht Schwerelosigkeit

Abb. 5
Dynamische Schwerelosigkeit entsteht auf Keplerschen Bahnen durch das Kräftegleichgewicht zwischen Trägheitskraft (Zentrifugalkraft) Z und Gravitation G.
M = Zentralmasse, m = umlaufende Masse,
v = Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung

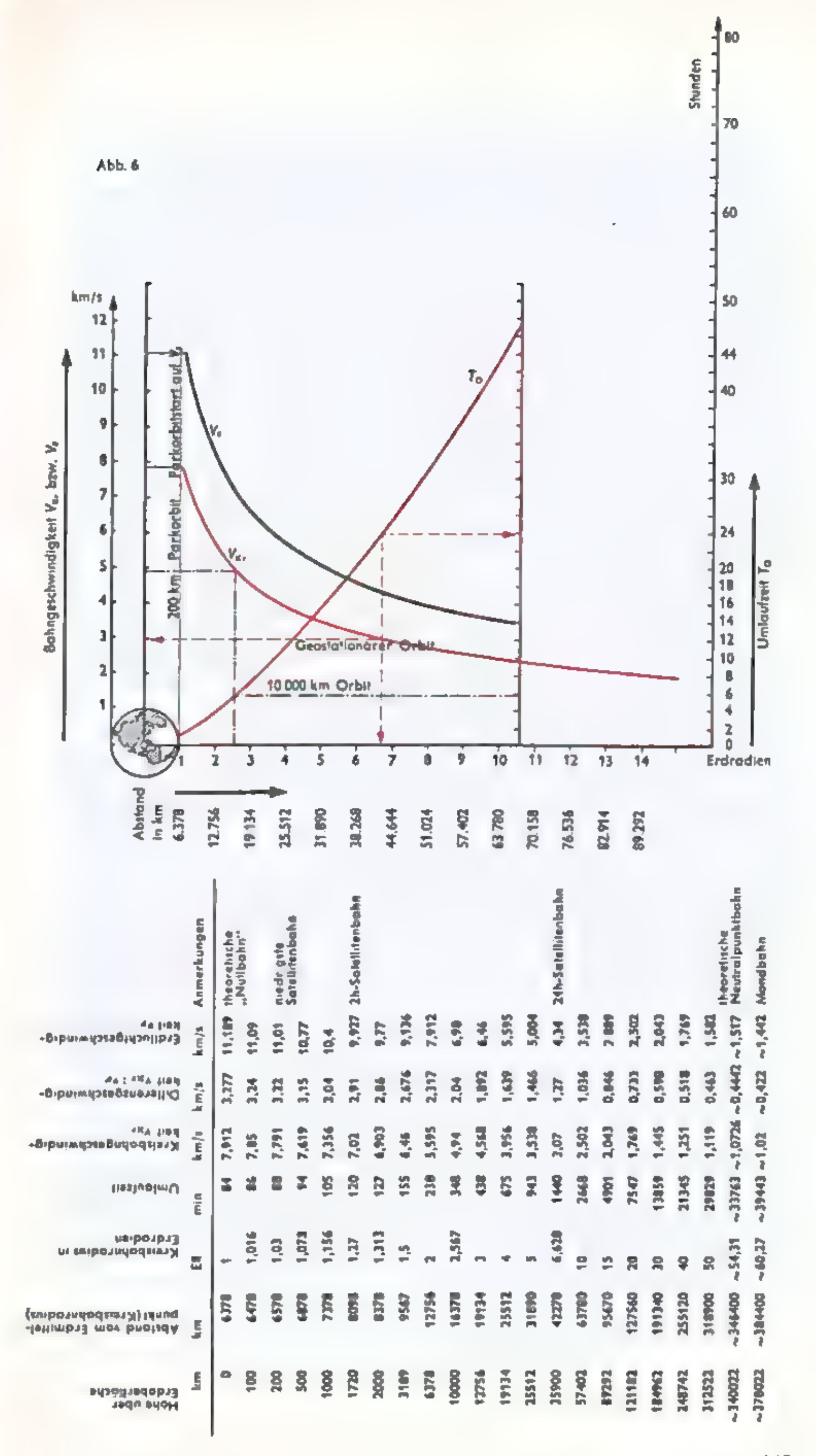
Abb. 6
Schwerelosigkeitssimulation durch Radialbeschleunigung wenn die Resultierende R (aus tangential gerichteter Geschwindigkeit v und Radialbeschleunigung Z) der Schwerkraft G entgegengesetzt proportional ist

HIMMELSMECHANIK/RAUMFLUGMECHANIK I

Für die Bewegung von Raumfahrzeugen im Sonnensystem gelten die von Kepler hergeleiteten und nach ihm benannten drei Gesetze der Planetenbewegung:

1. Die Planeten bewegen sich auf Ellipsenbahnen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.
2. Die von der Sonne zu einem Planeten gezogene Verbindungslinie (der Fahrstrahl oder Radiusvektor Sonne-Planet) überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.
3. Die Quadrate der Umlaufzeiten der Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen der großen Halbachsen ihrer Bahnellipsen.

Diese Gesetze lassen sich aus der Mechanik unter der Voraussetzung einer einzigen punktförmig konzentrierten Zentralmasse (Sonne) und einem von dieser beeinflußten Massenpunkt (Planet) herleiten. In der Mechanik des Raumflugs kann die Zentralmasse entweder die Erde, der Mond, die Sonne oder ein anderer Planet sein. An die Stelle des beeinflußten Massepunktes tritt dann das Raumfahrzeug, z. B. ein künstlicher Satellit.
Entsprechend Betrag und Richtung der Geschwindigkeit des Raumflugsystems im Moment des Brennschlusses (Abschalten des Raketentriebwerkes) ergeben sich elliptische oder (über die ursprüngliche Aussage der Keplerschen Gesetze hinausgehend) parabolische bzw. hyperbolische Raumflugbahnen. Die kreisförmigen Raumflugbahnen können als elliptische Bahnsonderfälle aufgefaßt werden. Abweichungen der tatsächlichen von den aufgeführten (idealisierten) Bahnformen treten infolge von Störungen durch andere Massen (Planeten, Monde), der nicht exakten Darstellbarkeit des Zentralkörper-Schwerefeldes durch das Feld einer Punktmasse oder aufgrund der Wirkung anderer Kräfte (z. B. Lichtdruck, Solarwind) auf. Derartige Bahnstörungen müssen bei exakten Rechnungen in der Raumflugmechanik berücksichtigt werden.
Aus der Schwerkraftwirkung (vgl. S. 642) läßt sich die Notwendigkeit einer Kompensation der Gravitation durch eine andere Kraft ableiten, soll ein Körper nicht wieder zur Erde zurückfallen. Diese Kraft ist die bei einer Kreisbewegung entstehende Zentrifugalkraft (Fliehkraft). Sie ist umso größer, je größer die Geschwindigkeit auf der Kreisbahn ist, das heißt, sie wächst mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. An einem Experiment mit einem an einem Faden befestigten Stein läßt sich beim Herumschleudern des Steines die Zentrifugalkraft F_z leicht feststellen. Wenn der Stein an einem Gummiband befestigt ist, läßt sich auch noch der Zusammenhang zwischen Umlaufgeschwindigkeit und Kreisbahndurchmesser demonstrieren. In der Raumflugmechanik wird bei Erreichen der Kreisbahngeschwindigkeit v_{Kr} die Gravitationswirkung durch die Zentrifugalkraft vollständig kompensiert. Der Raumflugkörper befindet sich dann im Kräftegleichgewicht. Er umkreist die Zentralmasse (z. B. die Erde) während aller Umläufe auf der gleichen Bahn bei konstanter Geschwindigkeit, wenn keine Störungen auf ihn einwirken. Die Kreisbahngeschwindigkeit ist von der Zentralkörpermasse und dem Abstand des umlaufenden Körpers vom Gravitationszentrum abhängig: $v_{Kr} = \sqrt{\gamma \cdot M/r_K}$ (v_{Kr} Kreisbahngeschwindigkeit, γ Gravitationskonstante, M Erdmasse, r_K Kreisbahnradius). Dividiert man den Umfang der Kreisbahn ($U_K = 2\pi r_K$) durch diese Bahngeschwindigkeit, so erhält man die Umlaufzeit des Raumflugkörpers $U = \sqrt{r_K^3/\gamma \cdot M}$. Zwischen der Kreisbahngeschwindigkeit $v_{Kr} = \sqrt{\gamma \cdot M/r_K}$ und der zur gleichen Entfernung vom Gravitationszentrum gehörenden Fluchtgeschwindigkeit $v_F = \sqrt{2\gamma \cdot M/r_K}$ ergibt ein Vergleich die Beziehung $v_F = \sqrt{2} \cdot v_{Kr}$.
Das 2. Keplersche Gesetz besagt qualitativ, daß ein Raumflugsystem die von der Zentralmasse weiter entfernten Teile einer antriebslosen Bahn (Freiflugbahn, Trägheitsbahn) langsamer durchläuft als die dem Zentralkörper näher gelegenen (Abb. 1 und 2).



Höhe über Erdoberfläche	Abstand vom Erdmittelpunkt (Kreisbahnradius)	Kreisbahnradius in Erdradien	Umlaufzeit	Kreisbahngeschwindigkeit v_{Kr}	Differenzgeschwindigkeit v_{Kr} : v_F	Erdfluchtgeschwindigkeit v_F	
km	km	ER	min	km/s	km/s	km/s	Anmerkungen
0	6378	1	84	7,912	3,277	11,189	theoretische „Nullbahn"
100	6478	1,016	86	7,85	3,24	11,09	
200	6578	1,03	88	7,791	3,22	11,01	niedrigste Satellitenbahn
500	6878	1,078	94	7,619	3,15	10,77	
1000	7378	1,156	105	7,356	3,04	10,4	
1720	8098	1,27	120	7,02	2,91	9,927	2h-Satellitenbahn
2000	8378	1,313	127	6,903	2,86	9,77	
3189	9567	1,5	155	6,46	2,676	9,136	
6378	12756	2	238	5,595	2,317	7,912	
10000	16378	2,567	348	4,94	2,04	6,98	
12756	19134	3	438	4,568	1,892	6,46	
19134	25512	4	675	3,956	1,639	5,595	
25512	31890	5	943	3,538	1,466	5,004	
35900	42278	6,628	1440	3,07	1,27	4,34	24h-Satellitenbahn
57402	63780	10	2668	2,502	1,036	3,538	
89292	95670	15	4901	2,043	0,846	2,889	
121182	127560	20	7547	1,769	0,733	2,502	
184962	191340	30	13859	1,445	0,598	2,043	
248742	255120	40	21345	1,251	0,518	1,769	
312522	318900	50	29829	1,119	0,463	1,582	
~340022	~346400	~54,31	~33763	~1,0726	~0,4442	~1,517	theoretische Neutralpunktbahn
~378022	~384400	~60,27	~39443	~1,02	~0,422	~1,442	Mondbahn

Aus dem 3. Keplerschen Gesetz folgt, daß die Umlaufzeiten um denselben Zentralkörper auch auf unterschiedlichen Umlaufbahnen gleich lang sind, wenn nur die großen Halbachsen (a) der Bahnen gleich lang sind. Vergleicht man also Ellipsenbahnen verschiedener Exzentrizität ($e < 1$) und stellt man gleiche Längen der großen Halbachse fest, ergeben sich trotz erheblicher Unterschiede in der Bahnform gleiche Umlaufzeiten. Da die Umlaufzeiten mit der Länge a wachsen (proportional zu $a^{3/2}$), führt das 3. Keplersche Gesetz zu einem scheinbar paradoxen Ergebnis: Befinden sich zwei Raumflugsysteme im selben Kreisorbit (Kreisbahn) und versucht das nachfolgende Raumflugsystem das vorausfliegende einzuholen, so muß seine Bahnbewegung durch einen Gegenschub und nicht durch in Bewegungsrichtung wirkende Schubkraft verändert werden. Eine in Bewegungsrichtung wirkende Schubkraft würde die große Halbachse vergrößern und dadurch zu einer längeren Umlaufzeit führen. Durch den Gegenschub dagegen wird eine niedere Bahn mit höherer Umlaufzeit eingenommen, so daß das andere Raumflugsystem überholt und in einem zusätzlichen Bahnanpassungsmanöver erreicht werden kann.

Die Entstehung der verschiedenen Raumflugbahnen kann man aus Kreisbahnen ableiten. Abb. 3 zeigt eine Auswahl von Bahnen, die man sich dadurch entstanden denken kann, daß in P ein Körper mit verschiedener Geschwindigkeit v, jedoch stets in senkrechter Richtung zur Verbindungslinie r gestartet wird. Der Körper wird dann der Geschwindigkeit entsprechende langgestreckte Ellipsen beschreiben, die die Erdoberfläche tangieren. Mit zunehmender Startgeschwindigkeit wird die Ellipse größer (nimmt die Ellipsenhalbachse zu, während die Exzentrizität abnimmt), bis die Kreisbahn mit der Kreisbahngeschwindigkeit V_{Kr} erreicht wird und der Körper nicht mehr zur Erde gelangt. Mit weiterhin zunehmender Startgeschwindigkeit wird die durch eine Parabelbahn gekennzeichnete Fluchtgeschwindigkeit oder gar eine hyperbolische Raumflugbahn erreicht. Der Punkt P ist in bezug auf die Trägerrakete eines Raumflugsystems Brennschlußpunkt der Aufstiegsbahn und gleichzeitig der Anfangspunkt der Raumflugbahn, in dem außer der Geschwindigkeit auch die für eine bestimmte Bahn errechneten Werte für Bewegungsrichtung, Höhen- und Seitenwinkel erreicht sein müssen. Um bei größeren, insbesondere bei bemannten Raumfluguntemehmen einen Vergleich der Soll- mit den Istbahnen und eventuelle Korrekturen zu ermöglichen, werden die Raumflugsysteme zunächst häufig in eine Parkbahn gebracht und aus dieser in die zum vorgesehenen Ziel führende Raumflugbahn gestartet.

Solange Raumflugbahnen als Zweikörperproblem aufgefaßt werden, haben auch im interplanetaren Raum durchflogene Bahnen die Form von Kegelschnitten. Einige wichtige Beispiele solcher Raumflugbahnen (Trajektorien), rot eingezeichnet, zeigt Abbildung 4. Zentralmasse M ist die Sonne, die innere Kreisbahn z. B. die Erdbahn und die äußere die Mond- oder eine Planetenbahn. Grundsätzlich gelten diese Bahntypen jedoch für alle interplanetaren Flüge. Vereinfacht wurden in den Abbildungen 4a bis g die Bahn des Ausgangsplaneten A und die des Zielplaneten B als kreisförmig angenommen. Der tatsächlich durchlaufene Teil der Trajektorie ist ausgezogen, seine Ergänzung zu einer vollständigen Kegelschnittkurve jeweils gestrichelt dargestellt.

Im Fall a handelt es sich um eine sogenannte Hohmann-Bahn. Die elliptische Übergangsbahn berührt gerade die innere und äußere Planetenbahn. Um diese Bahn zu durchfliegen, wird das Raumflugsystem, welches sich anfangs auf der inneren Kreisbahn zusammen mit dem Ausgangsplaneten um die Sonne bewegt, durch einen kurzen Schubimpuls tangential zur Ausgangsbahn im Punkt A beschleunigt. Danach bewegt sich das Raumflugsystem antriebslos in einer Trajektorie mit halbelliptischer Form bis zum Punkt B.

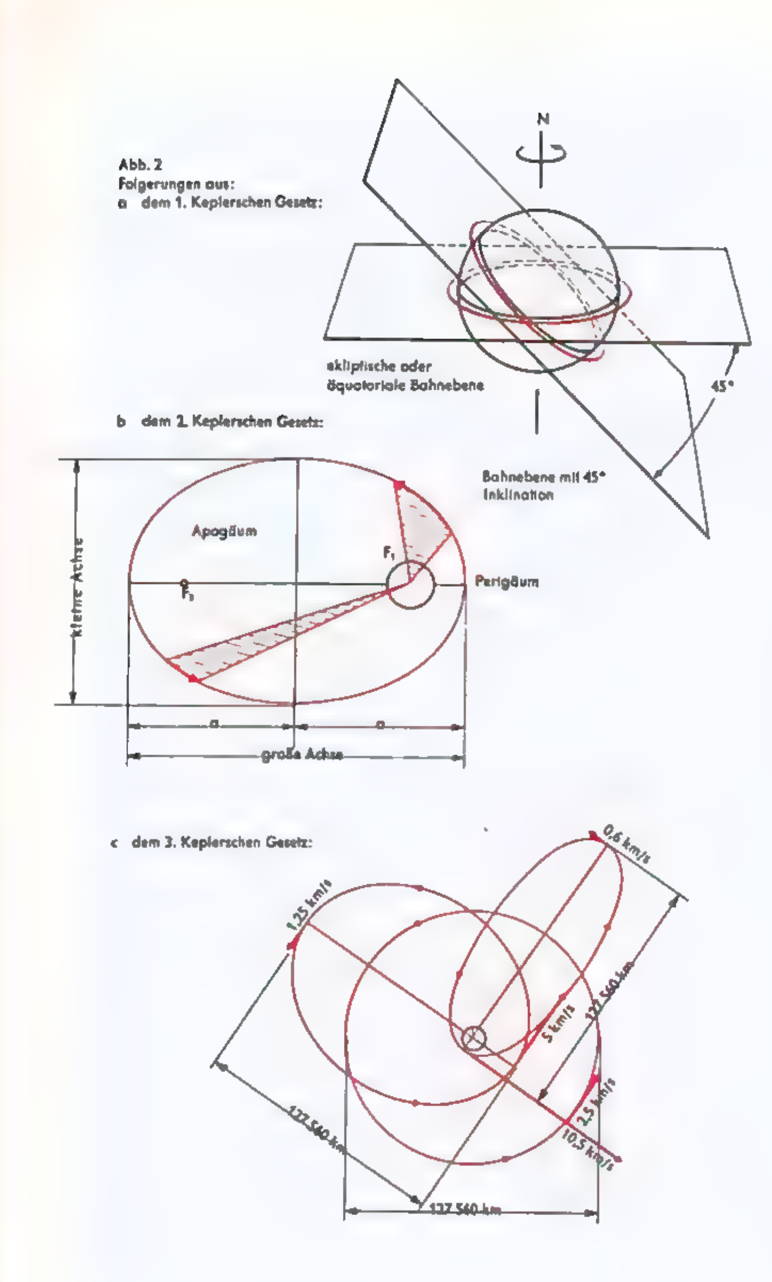


Abb. 2
Folgerungen aus:
a dem 1. Keplerschen Gesetz:
b dem 2. Keplerschen Gesetz:
c dem 3. Keplerschen Gesetz:

Erteilt man dem Raumflugsystem jedoch in B einen zweiten Schubimpuls geeigneter Größe in Bewegungsrichtung und tangential zur Zielplanetenbahn, so umkreist das Raumflugsystem die Sonne auf der Zielplanetenbahn. Hohmann-Bahnen erfordern einen relativ geringen Treibstoffaufwand. Nachteilig ist jedoch unter anderem die sehr langsame Annäherung des Raumflugsystems an den Zielplaneten im Punkt B infolge des 2. Keplerschen Gesetzes. Schnellere Trajektorien ergeben sich mit den die Planetenbahnen schneidenden Übergangsellipsen. In Abbildung 4 b tangiert die Trajektorie nur die äußere Bahn, während sie die innere schneidet. Abbildung 4 c zeigt den häufiger vorkommenden Fall der interplanetaren Trajektorie, bei der sowohl die Bahn des Ausgangs- wie die des Zielplaneten von einem Ellipsenbogen geschnitten wird. Gegenüber a erfordern die Bahnen b und c einen höheren Treibstoffaufwand, da höhere Brennschlußgeschwindigkeiten erreicht werden müssen. Die Bahnen der Abbildungen 4 a bis c bestehen jeweils aus Bogenstücken einer einzigen Ellipse, bei denen ein (bei a) und zwei kurze Schubimpulse (bei b und c) benötigt werden, um Trajektorie und Anpassung an die Zielbahn zu ermöglichen. Es ist jedoch auch möglich, den Zielplaneten auf einer Trajektorie zu erreichen, die sich aus Bögen von zwei oder mehr unterschiedlichen Ellipsen zusammensetzt. Bei bi-elliptischen Raumflugbahnen, welche aus zwei Ellipsenbögen bestehen, werden Schubimpulse in den Bahnpunkten A, B und C erforderlich (Abb. 4 d). Dadurch läßt sich Treibstoff sparen. Die aufgrund ihrer hohen Brennschlußgeschwindigkeit den größten Treibstoffaufwand erfordernden Trajektorien haben eine parabolische (Abb. 4 e) oder hyperbolische (Abb. 4 f) Bahncharakteristik. Diese beiden Raumflugbahnformen ermöglichen die kürzesten Flugzeiten zwischen Ausgangs- und Zielplanet, ihre Verwirklichung stößt jedoch zur Zeit noch auf Schwierigkeiten. Ein von den Verhältnissen, wie sie beim ungestörten Zweikörperproblem vorherrschen, wesentlich abweichender Bahntyp (Abb. 4 g) ist für elektrische Raketen von Bedeutung. Im Gegensatz zu Trägheitsbahnen, die antriebslos durchlaufen werden, wirkt bei dieser Spiralbahntrajektorie während des gesamten Fluges eine zwar schwache, jedoch beständige Schubkraft. Als Folge davon entartet die kreisförmige Anfangsbahn A zu einer Spirale, welche schließlich die Zielplanetenbahn schneidet oder durch rechtzeitige Schubumkehr in die Bahn des Zielplaneten überführt werden kann. Bei diesem Bahntyp gelten natürlich die Keplerschen Gesetze nicht mehr, da die Schubkraft himmelsmechanisch eine langdauernde Störung darstellt. Einen weiteren Sondertyp der Raumflugbahnen erhält man durch Nutzung der Fly-by- bzw. Swing-by-Technik. Diese Bahnen entstehen durch Einbeziehung der Gravitation von Planeten oder Monden in ein Trajektorieprogramm und folgen damit Keplerschen Gesetzen. Hierbei werden die Gravitations-Störkräfte zur Bahnveränderung ausgenutzt.

Die aufgeführten Bahnformen gelten auch für den suborbitalen Bereich (den Geschwindigkeitsbereich, in dem noch keine Kreisbahngeschwindigkeit erreicht wird). In Abbildung 5 sind drei ausgewählte Fälle schematisch dargestellt. Abbildung 5 a zeigt dabei den ballistischen Flug einer Interkontinentalrakete vom Startpunkt A zum Zielpunkt C, die größte Wurfhöhe wird unter Vernachlässigung des Luftwiderstandes in B erreicht. Abbildung 5 b gibt eine globale ballistische Flugbahn wieder, auf der eine Rakete den Startpunkt A nach einmaliger Erdumrundung wieder erreichen könnte, wenn Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung in Punkt B unterhalb der der Wurfhöhe entsprechenden Kreisbahngeschwindigkeit bliebe. Während diese zur Erde zurückführenden ballistischen Flugbahnen eine elliptische Charakteristik aufweisen, zeigt Abbildung 5 c den (zur Zeit noch nicht realisierbaren) Fall einer sehr schnellen Aufstiegsbahn von der Erde zur vorbestimmten Satellitenhöhe auf einem hyperbolischen Bahnteilstück.

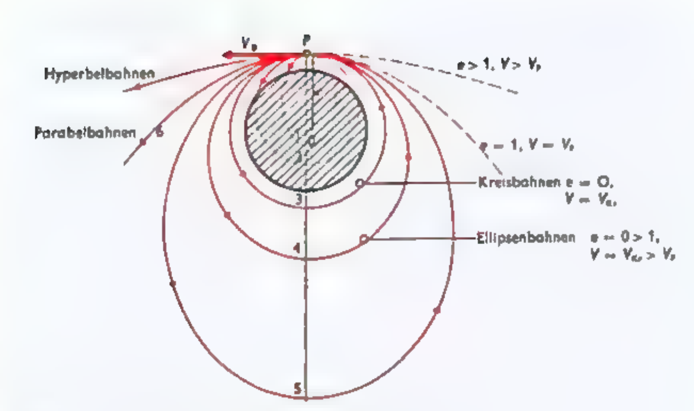


Abb. 3
Bahnkurven bei horizontalem Abschuß im Punkt P mit verschiedener Anfangsgeschwindigkeit V (der schraffierte Kreis ist die Erde)

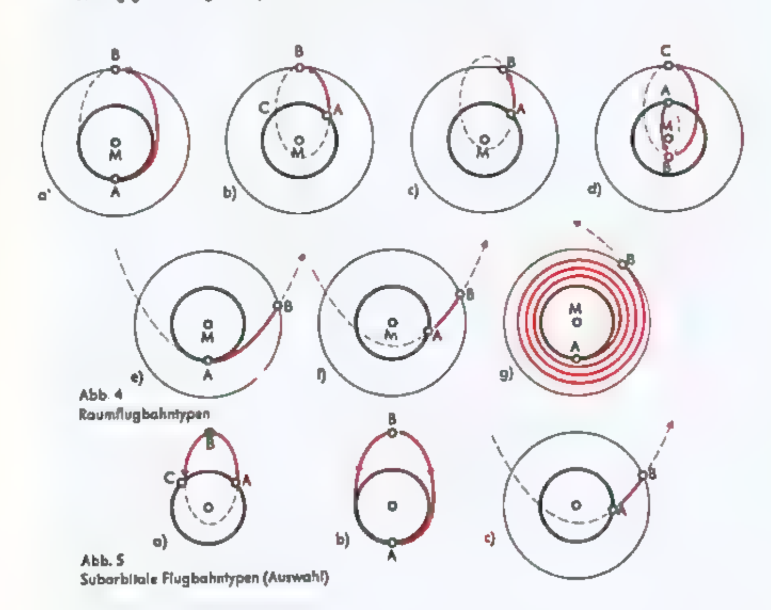


Abb. 4
Raumflugbahntypen

Abb. 5
Suborbitale Flugbahntypen (Auswahl)

RAUMFLUGBAHNDARSTELLUNGEN UND GRENZGESCHWINDIGKEITEN

Die zu starker Schematisierung neigende mathematisch-geometrische Raumflugbahnzeichnung ist im allgemeinen wenig anschaulich. Bessere Vorstellungen von der Raumflugbahntechnik lassen sich mit sogenannten „Gravitationstrichterdiagrammen" erzielen. In zweidimensionalen Koordinatensystemen werden (Abb. 1) die Abstände und Punkte gleicher Gravitationsstärke von einzelnen Planeten oder Planetensystemen (z. B. des Sonnensystems) eingetragen und untereinander verbunden. Auch Gravitationsfeldüberlagerungen und Gravisphäreabgrenzungen (z. B. örtlich das der Sonne durch Planeten und Monde) lassen sich so darstellen. Die zweidimensionale (ebene) Darstellungsart läßt sich zum dreidimensionalen (räumlichen) Trichter umformen, wenn man sich vorstellt, daß das ganze Diagramm um die durch die Sonne verlaufende Achse gedreht wird. Jeder Punkt der Trichterkurve beschreibt dann in gleichem Abstand von der Sonne einen Kreis und legt damit eine Kreislinie gleicher Gravitation (Isogamme) in bezug auf die Sonne fest. In gleicher Weise entstehen die Planetentrichter durch Drehung von deren Gravitationskurve um die ihnen zugeordnete senkrechte Achse. Damit ist die Voraussetzung für eine näherungsweise graphische Ermittlung optimaler (günstigster) Raumflugbahnen gegeben, wobei der proportionale Einfluß der Planetengravitationsfelder und ggf. deren Ausnutzung für die Raumflugbahnführung berücksichtigt werden kann. So läßt sich z. B. aus dem Diagramm ablesen, daß zum „Aufstieg aus dem Erdgravitationstrichter" mindestens 11,2 km/s (Fluchtgeschwindigkeit), für die Mars-Trajektorie (Überflug zum Mars) jedoch 13,5 km/s erforderlich sind, hingegen zur Venus nur 13,1 km/s. Auch die Raumflugbahnform läßt sich in diesen Diagrammen darstellen. Die Raumflugbahn verläuft stets auf der Wange des alles überlagernden Sonnengravitationstrichters, wie z. B. die Hohmannbahn Erde-Mars (Abb. 2) zeigt. Stets muß innerhalb des Planetensystems zunächst die Tiefe des Gravitationstrichters des Startplaneten überwunden, sodann eine himmelsmechanische Gleichgewichtsbahn zwischen solarer Gravitation und radialer Beschleunigung des Raumflugsystems eingehalten werden, um in die Nähe des Zielplaneten und dessen Gravitationstrichter zu gelangen.

Eine andere anschauliche, jedoch weniger für die Bahnbestimmung geeignete Darstellungsform ist die perspektivische Raumflugbahndarstellung (Abb. 3). Nach Festlegung der Planetenkonstellation zu einem gegebenen Zeitpunkt lassen sich hier durch Einzeichnen der der Raumflugbahngeschwindigkeit entsprechenden Kegelschnitte ebenfalls die z. B. zwei Planeten verbindende Raumflugbahn darstellen. Auch jede andere Bahnform ist unter Berücksichtigung der entsprechenden Grenzgeschwindigkeit (siehe Tabelle) oder der für einen bestimmten Flugauftrag erforderlichen Geschwindigkeit zeichnerisch demonstrierbar, wie die eingetragenen Flugbahnen zeigen.

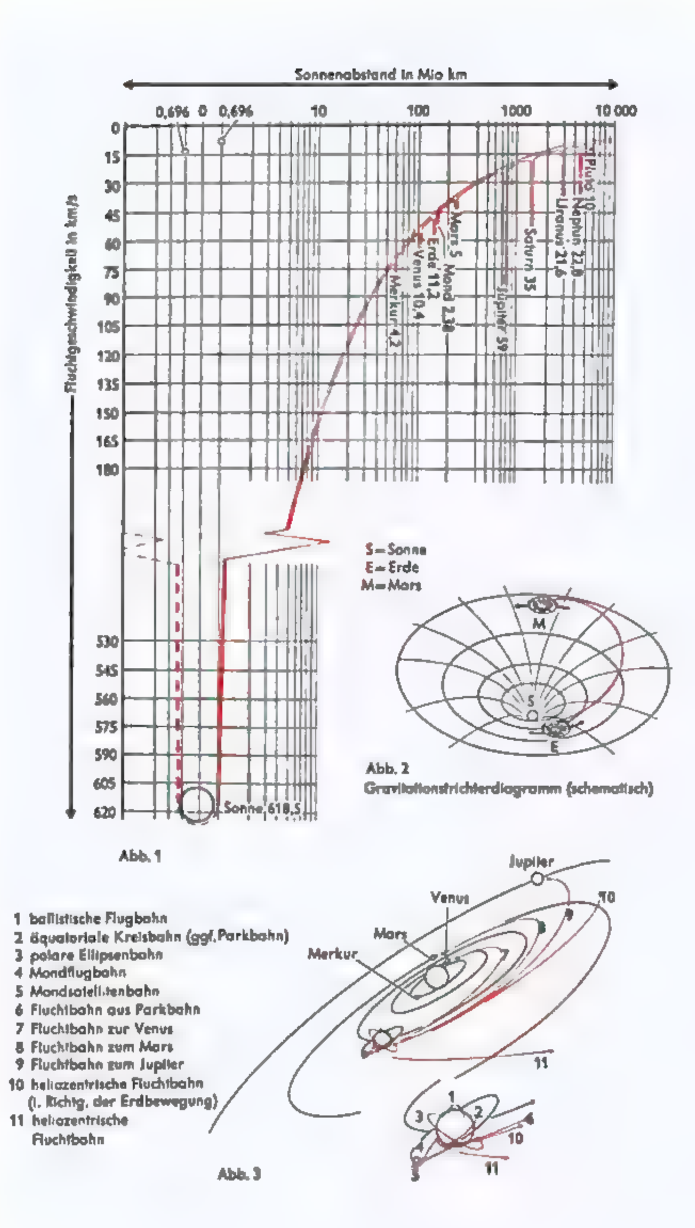


Abb. 1

Abb. 2 Gravitationstrichterdiagramm (schematisch)

Abb. 3

RAUMFLUGMANÖVER I

Lenkmanöver stellen die Zusammenfassung mehrerer einzelner oder aller das Flugprogramm eines Raumflugsystems beeinflussender Maßnahmen dar, sie werden auch kurz als „Manöver" bezeichnet. Sie setzen sich im allgemeinen aus Lageänderung und/oder Maßnahmen zur Kursveränderung, der eigentlichen Lenkung, zusammen (s. Seite 656). Da es aus unzureichender Kenntnis himmelsmechanischer Zusammenhänge, teilweise auch aus Gründen eines nur begrenzt möglichen technischen Aufwandes — besonders bei langdauernden oder weitreichenden Raumflügen — unmöglich ist, die erforderliche Sollflugbahngenauigkeit einzuhalten, werden vielfach spezielle Manöver im Flugprogramm eingeplant. Durch diese werden dann die während einer vorgegebenen Flugzeit aufgetretenen und summierten Abweichungen ausgeglichen. Von besonderer Bedeutung sind hierbei die im Rahmen eines Flugprogramms festgelegten und hinsichtlich ihrer Bedeutung unterschiedenen Anfangs-, Mittekurs- und End-Flugbahnmanöver (Abb. 1). Diese auch als Anfangs-, Mitten- und Endnavigation bezeichneten Manöver werden mehr oder minder willkürlich auf ballistische, orbitale oder interplanetare oder auch auf Flugbahnabschnitte wie z. B. die Aufstiegsbahn bezogen. Unter Anfangs-Flugbahnmanöver werden diejenigen zu einer weitgehenden Übereinstimmung zwischen Soll- und Ist-Flugbahn dienenden Maßnahmen (z. B. auf ballistischer Bahn) verstanden, die noch vorwiegend in der Atmosphäre und gegebenenfalls unter Verwendung von „aerodynamischen Rudern" vorgenommen werden — also in einer relativ langsamen Flugphase, aber auch alle Manöver bis zum Einflug in eine Raumflugbahn. Ziel hierbei ist es, möglichst genaue Ausgangswerte für die weiteren Flugphasen, z. B. bei Brennschluß zu erreichen.

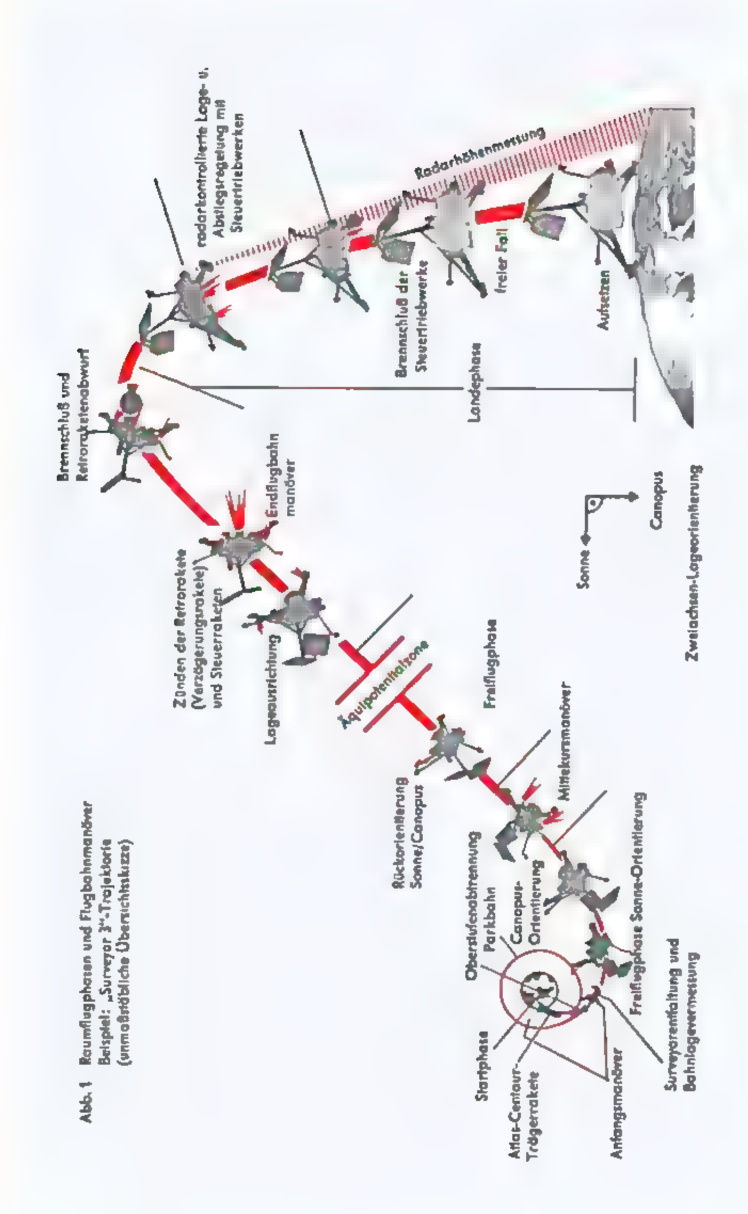


Abb. 1 Raumflugphasen und Flugbahnmanöver
Beispiel: „Surveyor 3"-Trajektorie
(unmaßstäbliche Übersichtsskizze)

RAUMFLUGMANÖVER II

Während in diesem bisher besprochenen Flugbahnbereich neben Lageregelungs- und Lenk-Raketentriebwerken auch aerodynamische Hilfsmittel eingesetzt werden können, liegt der Bereich der Mittekursmanöver (Abb. 2) grundsätzlich im luftleeren Raum, so daß nur passive und aktive Lageregelungssysteme und Raketensteuertriebwerke eingesetzt werden können. Hinzu kommt in diesem Flugbahnbereich, daß infolge der durch die hohen Geschwindigkeiten gegebenen Trägheitskräfte eine große „Bahnsteifigkeit" gegeben ist, die nur durch einen entsprechend großen Energieaufwand bei Lenkmanövern zu beeinflussen ist. Die Einschaltung von Mittekursmanöverpunkten — die nicht unbedingt in der Mitte der Flugbahn zu liegen brauchen — hilft insofern die meistens in Treibstoffen oder auch elektrischer Form gebundene Energie sparen, da sich bis zu diesem Punkt Fehler summieren aber auch gegenseitig subtrahieren. Bei lunaren und interplanetaren Flügen sind vielfach auch mehrere Mittekursmanöver im Flugprogramm enthalten (siehe z. B. Apollo, Seite 668).
Die Endkursnavigation (Abb. 3) dient dazu, unmittelbar vor dem Ziel letzte Flugbahnkorrekturen durchzuführen. Auch sie finden außerhalb von Atmosphären statt und dienen dazu, möglichst genaue Ausgangswerte (Soll-/Ist-Übereinstimmung) für die End- oder Zielanflug-Phase zu erhalten. Vielfach dienen Endkursmanöver auch dem Eintritt in einen Flugbahn- oder Wiedereintritts-Korridor, der unter Einhaltung vorgegebener Flugbahn- und Geschwindigkeitsbedingungen die Erreichung eines Zieles gewährleistet.
Bei allen Flugbahnmanövern handelt es sich im allgemeinen um Lenkmanöver zur Korrektur von Abweichungen zwischen der errechneten „Sollflugbahn" und der effektiv geflogenen „Istflugbahn" oder um die Anpassung an eine neue Flugphase. Spezielle Mittekursmanöver dienen auch dem Übergang von einer elliptischen in eine hybride Flugbahn, wie z. B. bei den Apollo-Flügen zum Mond (s. Seite 668). Im allgemeinen sind Korrektur- oder Flugbahnänderungsmanöver auch mit Lageänderungsmaßnahmen verbunden oder werden durch diese erst ermöglicht.

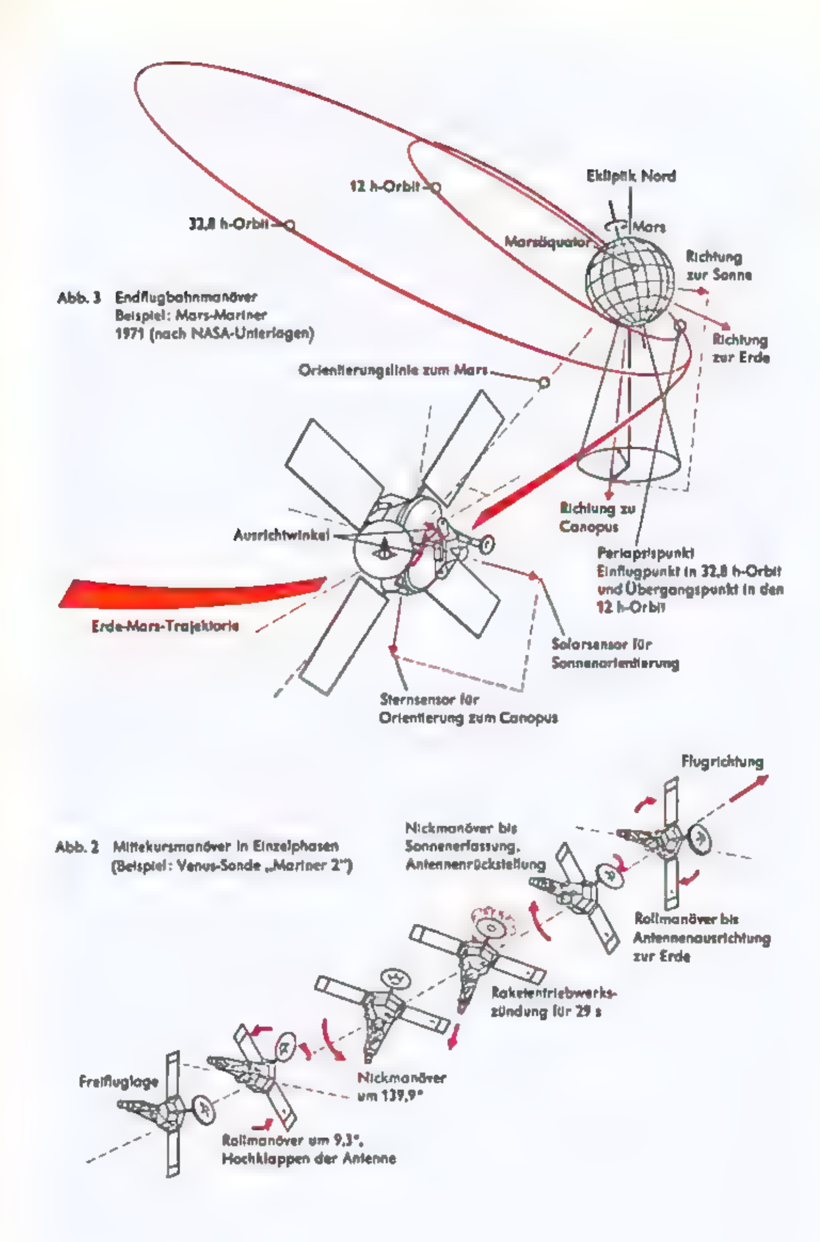


Abb. 3 Endflugbahnmanöver Beispiel: Mars-Mariner 1971 (nach NASA-Unterlagen)

Abb. 2 Mittekursmanöver in Einzelphasen (Beispiel: Venus-Sonde „Mariner 2")

LAGEREGELUNG, LENKUNG, FLUGBAHNMANÖVER I

Raketen und Raumflugsysteme müssen wie jedes Fahrzeug über eine stabile Lage verfügen und lenkbar sein. Lagebestimmung und -regelung sowie Lenkung lassen sich, wie beim Flugzeug, auf die drei im Schwerpunkt zueinander senkrecht stehenden Körperachsen beziehen (Abb. 1): Rollachse, Nickachse und Gierachse. Als Symmetrieebene gilt hierbei im allgemeinen die x-, z-Ebene. Die Drehung des Flugsystems um die Körperlängsachse (x-Achse) wird als Rollbewegung, ein Kippen in der Bahnebene um die y-Achse als Nickbewegung und die Drehung senkrecht zur Bahnebene um die z-Achse als Gierbewegung bezeichnet. Da um jede Achse zwei Bewegungsrichtungen möglich sind, ergeben sich insgesamt sechs Bewegungsmöglichkeiten, die durch die entsprechenden Drehwinkel beschrieben werden. Durch die drei Achsen des Körpers wird auch seine Lage in bezug auf ein unbewegtes räumliches Koordinatensystem (Inertialsystem) festgelegt (Abb. 2).

Eine einfache Beschreibung der relativen Körperlage des Flugsystems zum Bezugssystem ist durch die Vermessung der auf der Bezugsebene verlaufenden, rechtwinklig zur Flugbahn projizierten Spurpunktbahn oder -kurve als „Entfernung" zwischen den beiden Nullpunkten der Koordinatensysteme, ihrer Höhendifferenz und relativer Winkelunterschiede möglich. Für die Praxis ist die Beschreibung der momentanen Lage und Bewegung z. B. relativ zum erdfesten Bezugssystem durch sechs Projektionen des Schwerpunktes und der Drehgeschwindigkeiten zweckmäßiger (Abb. 3). Dadurch wird eine Verwendung von Beschleunigungsmessern bzw. Trägheitsplattformen zur — mindestens zeitweiligen — autonomen Orts- und Lagebestimmung möglich, vergleiche Seite 660.

Ohne äußere Einflüsse behält ein Körper aufgrund des Trägheitsgesetzes seine Bewegungsrichtung bei. Nach dem Newtonschen Dynamikgesetz ist in einem unbeschleunigten Bezugssystem eine Lage- und Bewegungsrichtungs-Änderung nur durch eine beschleunigende Krafteinwirkung auf die Körpermasse möglich. Jede Lageänderung (z. B. Drehung) wie jede Flugbahnänderung erfordert daher eine Kraftwirkung in der gewünschten Richtung. Der einfachste Fall ist die Beschleunigung in Bewegungsrichtung (durch zusätzlichen Triebwerksschub), wodurch eine höhere Eigengeschwindigkeit erzielt wird (Abb. 4). Zur Drehung um die drei Körperachsen sind (über einen Hebelarm zum Schwerpunkt) angreifende Schubkräfte erforderlich, die je nach Wirkrichtung Rollen, Nicken oder Gieren bewirken, ohne daß die Bahn des Schwerpunktes verändert wird wie dies die Steuertriebwerkpaare der Abbildung 5 zeigen. Erst eine senkrecht zur Bewegungsrichtung (genau: zur momentanen Bahntangentenrichtung im Körperschwerpunkt) wirkende Schubkraft erzeugt einen die Flugbahn ändernden Lenkwinkel (Abb. 6 u. 7).

Zur Kenntlichmachung der verschiedenen Bewegungen und deren Beeinflussung werden unterschieden: Unter Lenkung wird die Veränderung des bewegten Körpers nach Richtung und Geschwindigkeit (physikalisch: die Beeinflussung der Schwerpunktsbahn) verstanden. Als Winkeländerungen um den Schwerpunkt, Lageregelung oder auch Steuerung wird die Körperorientierung über die drei Achsen im Raum bezeichnet. Als Teilbereich der Lageregelung ist die Stabilisierung die gesteuerte oder selbsttätige Einhaltung einer bestimmten Lage gegenüber Störungen. Lenkmanöver stellen die Zusammenfassung mehrerer einzelner oder aller das Flugprogramm beeinflussender Maßnahmen dar, sie werden kurz auch als „Manöver" bezeichnet. Im Rahmen eines Flugprogramms werden ferner Anfangs-, Mittekurs- und End-Flugbahnmanöver unterschieden. Hierbei handelt es sich im allgemeinen um Lenkmanöver zur Korrektur von Abweichungen zwischen der errechneten „Sollflugbahn" und der effektiv geflogenen „Istflugbahn" oder um die Anpassung an eine neue Flugphase.

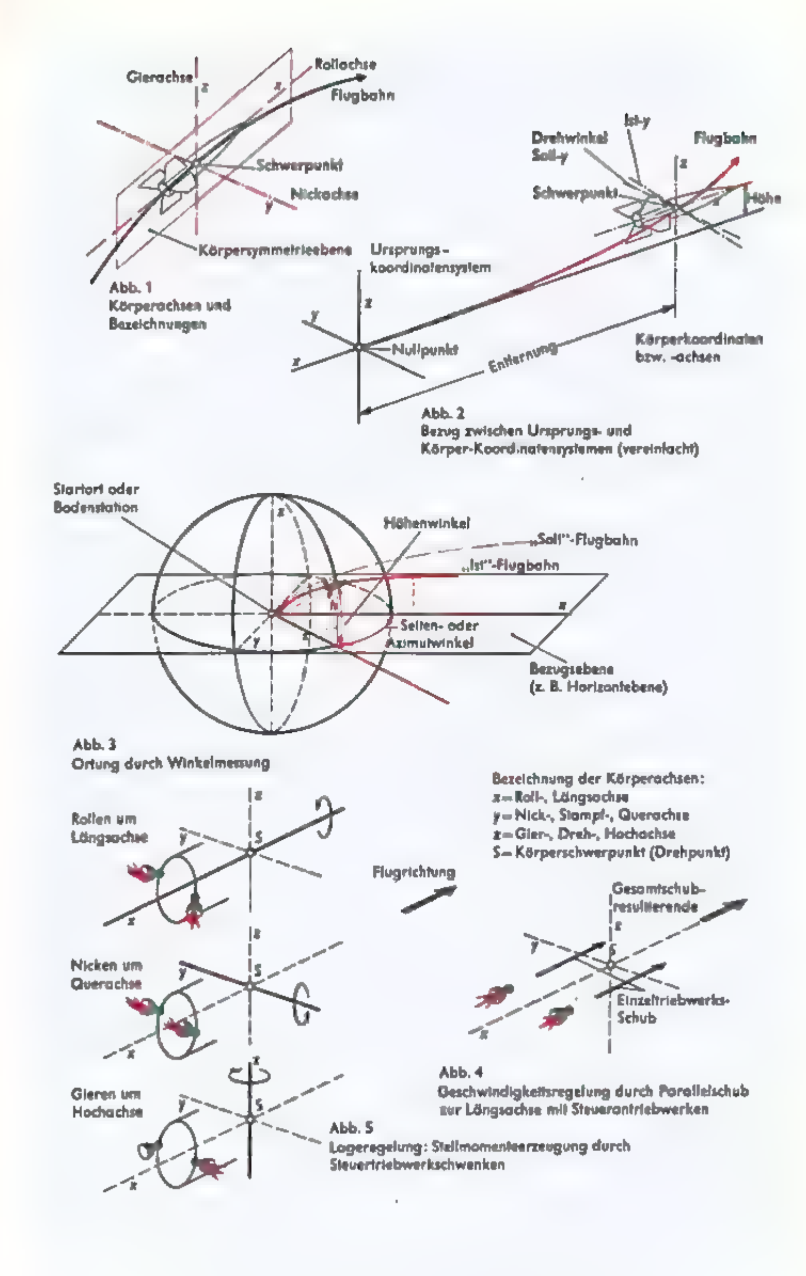


Abb. 1 Körperachsen und Bezeichnungen

Abb. 2 Bezug zwischen Ursprungs- und Körper-Koordinatensystemen (vereinfacht)

Abb. 3 Ortung durch Winkelmessung

Abb. 4 Geschwindigkeitsregelung durch Parallelschub zur Längsachse mit Steuerantriebwerken

Abb. 5 Lageregelung: Stellmomenterzeugung durch Steuertriebwerkschwenken

LAGEREGELUNG, LENKUNG, FLUGBAHNMANÖVER II

Außer zum Einhalten der Fluglage und -richtung während des Starts, der Korrektur von hierbei auftretenden kleinen Abweichungen usw. dienen die aufgeführten Baugruppen der Aufhebung von Taumelbewegungen, denen z. B. jeder nicht stabilisierte Satellit unterworfen ist, der Erreichung einer vorbestimmten, z. T. von der Flugaufgabe abhängigen Lage und deren möglichst präzisen Einhaltung; außer einer gelegentlichen kleinen Flugbahnregelung ist es also Hauptaufgabe der Lageregelungssysteme Störmomente aufzuheben. Die verwendeten Methoden sind hierbei z. T. nur höhenabhängig einsetzbar. So kann eine Luftwiderstandsstabilisierung nur bis etwa 400 km Höhe wegen der abnehmenden Luftdichte angewandt werden. Sie erfolgt durch flugzeugähnliche Ruder oder Nachschleppen von Widerstandskörpern (z. B. Ballons), die bei Richtungsstörungen ein Rückdrehmoment bewirken. Ein weiteres einfaches aus der Ballistik bekanntes Lageregelungssystem ist die Drallstabilisierung (Spinstabilisierung). Hierbei wird das Raumflugsystem um die Hauptträgheitsachse in Rotation versetzt und behält aufgrund des Kreiseleffektes seine Lage bei.
Im Höhenbereich zwischen etwa 300 und 40 000 km ist durch Ausnutzung der höhenabhängigen Gravitationsunterschiede in Verbindung mit der auf den Satelliten wirkenden Zentrifugalkraft ein Richtmoment zum Erdmittelpunkt erzeugbar, indem die Satellitenmasse M über einen Ausleger mit einer kleineren Masse m verbunden wird. Solange sich die kleinere Masse auf einer gegenüber dem Satelliten „höheren" Bahn befindet, unterliegt sie einer geringeren Gravitation aber höheren Zentrifugalkraft. Dadurch versucht sich dieses zweiteilige Massensystem stets radial zum Erdmittelpunkt einzustellen, wodurch die Satellitenmasse ebenfalls radial erdorientiert wird. Der gleiche Effekt tritt ein, wenn m auf einer „niederen" Bahn als M um die Erde läuft, nur überwiegt dann das Gravitationsmoment auf m. Der solare Strahlungsdruck läßt sich ebenfalls zur Lageregelung (oberhalb etwa 5000 km) ausnutzen, da unterschiedlich beaufschlagte „Sonnenwindflügel" solange ein rückdrehendes Moment erzeugen, bis zwei symmetrisch durch einen Hebelarm verbundene Flügel eine Gleichgewichtslage senkrecht zur Sonne erreicht haben.
Die passive magnetische Stabilisierung wirkt wie eine Kompaßnadel. Ein im Satelliten fest eingebauter Dauerstabmagnet orientiert sich dabei im Erdmagnetfeld an den Feldlinien. Die Lageregelung wird damit entsprechend des Erdmagnetfeldlinienverlaufes „automatisiert". In gleicher Weise kann auch eine elektrische Spule je Körperachse zur Erzeugung eines Drehmomentes im Magnetfeld und damit zur halbaktiven Lageregelung verwendet werden, da jeweils zur Spulenebene ein senkrechtes Richtmoment entsteht. Magnetfeldstabilisierungen sind zwischen 300 bis 20 000 km Höhe anwendbar.
Ebenfalls als halbaktives System kann die Lageregelung durch Steuerkreisel (Reaktionsschwungräder) bezeichnet werden, da hierbei ein Kreisel als mechanisch bewegte „Schwungmasse" dient, dessen Trägheitsmoment zur Lageregelung ausgenutzt werden kann. Je ein aus Metall oder einem mit Quecksilber gefüllten Ringrohr bestehender Steuerkreisel pro Achse des Raumflugsystems ermöglicht eine Lageregelung über alle drei Körperachsen. Eine Variante dieser Grundform sind einzelne Stabilisierungsschwungräder, die z. B. axial im Satelliten fest eingebaut werden und ständig mit 3000—5000 Upm rotieren. Damit wird durch Kreiselwirkung für die x- und y-Achse eine ausreichende Lageorientierung erzeugt, während die Stabilisierung um die z-Achse (Rotationsachse) nur durch Drehzahländerung und dadurch ausgelöste Reaktionsmomente bewirkt wird.
Aktive Lageregelungssysteme bestehen im allgemeinen aus der Kombination mehrerer Kleinraketentriebwerke oder Kaltgas-Schubdüsen (Abb. 5—7).

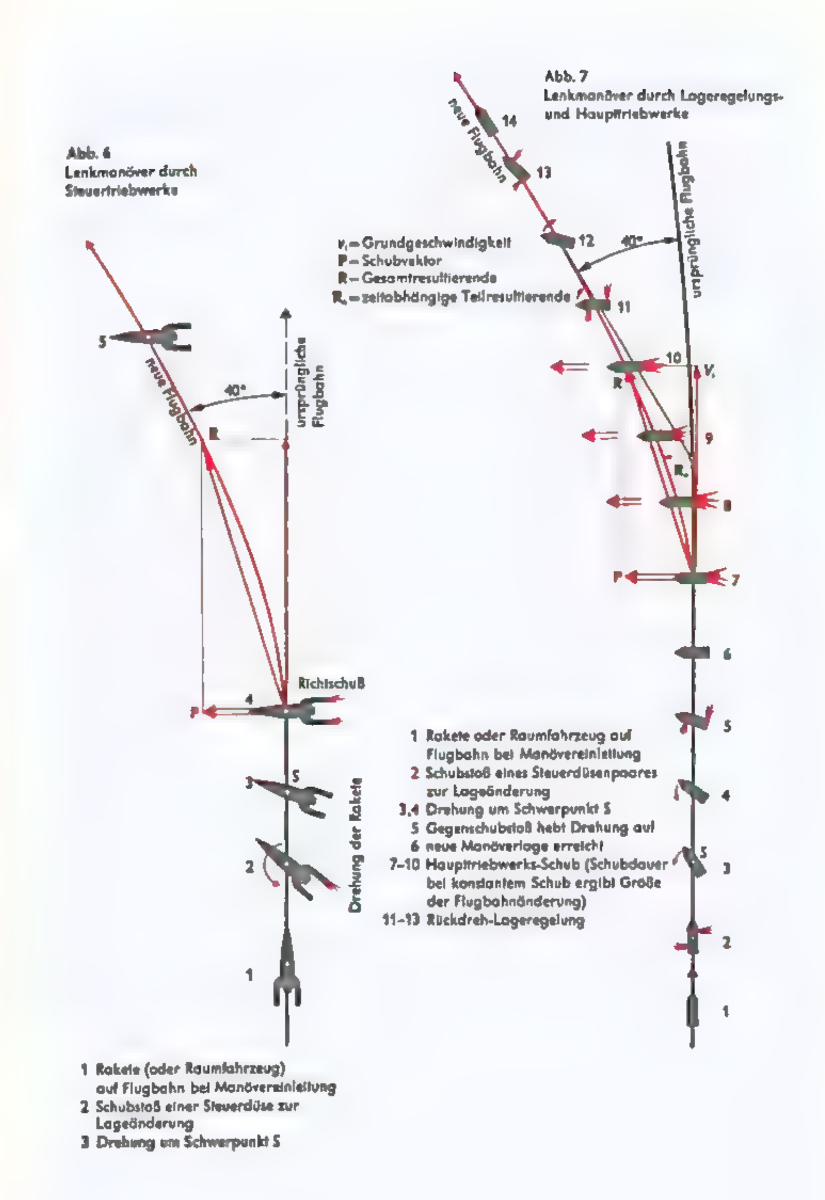


Abb. 6
Lenkmanöver durch Steuertriebwerke

Abb. 7
Lenkmanöver durch Lageregelungs- und Haupttriebwerke

TRÄGHEITSNAVIGATION I

Die Trägheitsnavigation ist ein Navigationsverfahren, das keine außerhalb des bewegten Körpers (z. B. Rakete, Satellit, Raumfahrzeug) liegenden Bezugspunkte benötigt, wie sie die terrestrische oder astronomische Navigation erfordern — wobei die terrestrische bekannte (vermessene) Bezugspunkte wie Leuchttürme, Startort oder Beobachtungsorte und die astronomische Fixsterne (z. B. Sonne, Cannopus) am Firmament benutzen. Bei der Trägheitsnavigation wird ein mit dem Raumflugkörper beweglich verbundenes Bezugssystem (Leitsystem) verwendet, das durch die stabilisierende Wirkung von Kreiseln im Raum eine feste Lage einnimmt. Auf dieses Bezugssystem werden z. B. die drei Körperachsen des Raumflugsystems bezogen. In dem Leitsystem sind in drei zueinander senkrechten Richtungen Beschleunigungsmesser angebracht (Abb. 1). Diese liefern mit den drei Beschleunigungskomponenten (Teilkräften) die Gesamtbeschleunigung im Raum nach Betrag und Richtung. Aus der Beschleunigung b ergibt sich durch eine Integration nach der Zeit t die Geschwindigkeit v und nach einer zweiten Integration der zurückgelegte Weg s ebenfalls nach Größe und Richtung (Abb. 2). Diese Integrationen nimmt eine Datenverarbeitungsanlage vor und vergleicht die gewonnenen Daten mit denen der vorausberechneten Flugbahn, die ihr eingespeichert wurden. Sie veranlaßt dann über elektrische und/oder hydraulische Servosysteme die Erzeugung der Schubgröße und -richtung zur erforderlichen Kurskorrektur und beseitigt damit Kursabweichungen, die z. B. durch starken Wind beim Raketenstart oder unbekannte Einflüsse auf Raumflugsysteme entstehen.

Die Beschleunigungsmesser messen eine physikalische Größe, die jeder Kraftfahrer kennt, wenn er stark auf das Gaspedal tritt; sie ist die Ursache jener Kraft, die ihn gegen die Lehne seines Sitzes drückt: seine träge Masse leistet der raschen Geschwindigkeitsänderung einen Widerstand (Trägheitswiderstand), der ebenfalls maßgebend für die Größe der Kraft ist (entsprechend dem Newtonschen Kraftgesetz, wonach diese Reaktionskraft gleich dem Produkt aus Masse und Beschleunigung ist). Diese Trägheitswirkung benutzt man im Beschleunigungsmesser der Steueranlagen zur Messung der Beschleunigung (Abb. 3). Von zwei Spiralfedern wird eine Masse in einer Ruhestellung festgehalten, in der sie auch während einer Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit verharrt (Neutral- oder Null-Lage). Erfährt das System eine Beschleunigung in Pfeilrichtung, so bleibt die Masse aufgrund ihrer Trägheit hinter der Bewegung zurück, streckt dabei die vordere und drückt die hintere Feder zusammen. Die Masse steuert einen Potentiometerkontakt, dessen Nullage der der Masse entspricht. Eine positive Beschleunigung liefert so eine ihrer Größe proportionale (entsprechende) positive Spannung, während eine negative Beschleunigung (Verzögerung) eine entsprechende negative Spannung ergibt. Betreibt man mit dieser Spannung einen Motor, so ist jeweils die Gesamtzahl seiner Umdrehungen der Geschwindigkeit proportional. Diese apparative Kombination Potentiometer/Motor stellt damit einen Integrator dar. Ein zweiter Integrator verwandelt die Geschwindigkeit in den zurückgelegten Weg (nach Größe und Richtung). In Abbildung 4 ist dieser doppelte Integrationsprozeß für die Koordinatenrichtung x schematisch dargestellt. Für jede weitere Körperachse ist die gleiche Anordnung erforderlich.

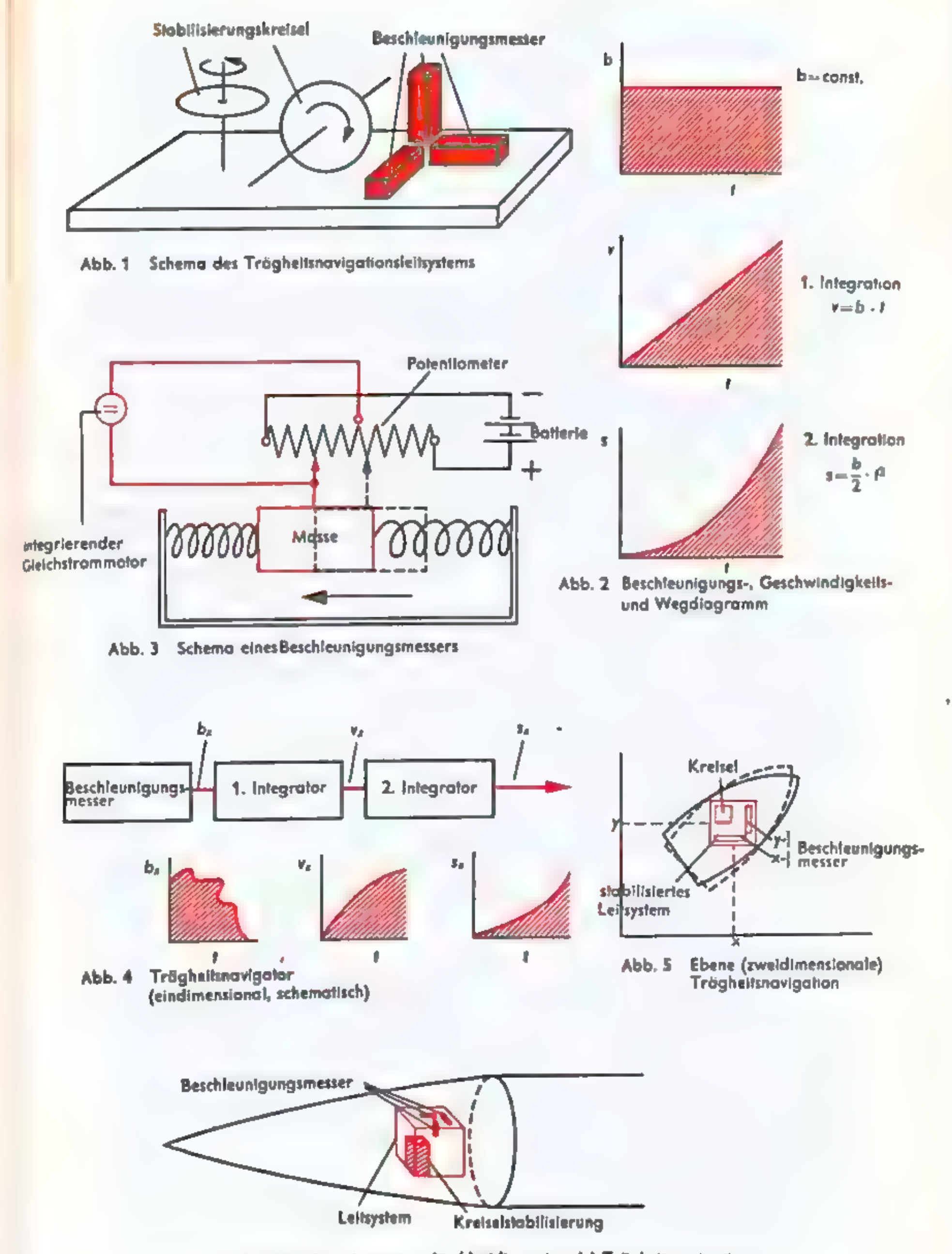


Abb. 1 Schema des Trägheitsnavigationsleitsystems

Abb. 2 Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Wegdiagramm

Abb. 3 Schema eines Beschleunigungsmessers

Abb. 4 Trägheitsnavigator (eindimensional, schematisch)

Abb. 5 Ebene (zweidimensionale) Trägheitsnavigation

Abb. 6 Raketenkopf mit Leitsystem für (dreidimensionale) Trägheitsnavigation

TRÄGHEITSNAVIGATION II

Die schematische Anordnung der Instrumente für ein in bezug auf eine Ebene (zweidimensional) bewegtes Fahrzeug (z. B. Schiff) zeigt Abb. 5, während die Anordnung für eine sich im Raum bewegende Rakete (dreidimensional) in Abb. 6 dargestellt ist. Diese „reine Trägheitslenkung" erfordert teure Kreisel-Referenzsysteme größter Genauigkeit (weniger als 0,03° Drift pro Stunde) und aufwendige Bordrechner, ohne daß es dadurch möglich ist, die Kreiseldriftfehler soweit auszugleichen, daß bei Flügen über Wochen oder Monate eine ausreichende Lagereferenz gewährleistet wird. Trägheitsnavigations- und Trägheitslenksysteme werden daher mit Zusatzsystemen kombiniert, die eine Korrektur der im Laufe der Zeit auftretenden Fehler ermöglichen. Je nach der Kombination ergeben sich damit Grundformen der funkgestützten Trägheitslenkung, der horizont- oder himmelsorientierten Trägheitslenkung und der zielsuchenden, auf optischer, Radar- oder Infrarot-Ortung aufbauenden Navigation.

Funkgestützte Trägheitssysteme (Abb. 7) entsprechen in den Grundzügen bordseitig der reinen Trägheitslenkung. Im Unterschied zu dieser ist jedoch die Genauigkeitsforderung an das Kreiselsystem herabgesetzt (etwa 0,5° Drift pro Stunde), Kommandoempfänger, Bordrechner und Kommandowerk können einfacher ausgeführt werden, da eine oder mehrere Bodenstationen mit Rechenanlagen die „Ist-" mit den „Sollbahnwerten" vergleichen und erforderlichenfalls entsprechende Korrekturbefehle über Bodensender-Bordkommandoempfänger an das Kreiselreferenzsystem und/oder Bordrechner bzw. Kommandowerk abgeben. Nur die Anzahl und Lage der Bodenstationen, die Häufigkeit der Ist-/Sollbahn-Vergleiche sowie die Entfernung zwischen Bodenstationen und z. B. Raumflugsystemen begrenzen die Einsatzgenauigkeit funkgestützter Trägheitssysteme.

Bei der himmels- oder horizontorientierten Trägheitslenkung (Abb. 8) wird die Trägheitsplattform mit Sternsensoren (Sternpeilern) oder mit Horizontsensoren (Horizontsucher) kombiniert, die ständige Vergleichswerte aus dem Bezug zum angepeilten Objekt liefern. Durch Vergleich der von Sternsensoren gewonnenen Flugbahndaten mit denen der Trägheitsnavigation und der Sollflugbahn im Bordrechner können Kreiseldriftfehler sofort oder summiert in Mittekursmanövern ausgeglichen werden, so daß auch sehr lange Flüge (interplanetare Bahnen z. B. zu Mars oder Venus) mit hoher Flugbahngenauigkeit durchführbar werden. In ähnlicher Weise werden die durch Horizontsensoren gewonnenen Vergleichsdaten verwendet, nur ist der Einsatzbereich der horizontorientierten Trägheitslenkung auf die Nähe der Himmelskörper beschränkt und wird bei der Verwendung von Infrarotdetektoren durch dessen Wärmeabstrahlung oder die Wärmeempfindlichkeit der Detektoren weiter eingeengt.

Zielsuchende Trägheitsnavigations- und Lenksysteme nehmen über Sensoren Informationen oder über Antennen Signale auf, die von einem Zielobjekt ausgehen. Dies können z. B. charakteristische Werte (u. a. Lichtreflexion, Wärmeabstrahlung) des Zieles oder Radarsignale eines anderen Raumflugsystems sein. Auch mittels bordeigener Verfolgungsradaranlagen lassen sich die notwendigen Daten beschaffen. Umfangreichere und längere Flugaufgaben erfordern vielfach die Eingliederung des zielsuchenden Lenksystems mit Trägheitsplattformen und dem Bordrechner in ein Gesamtsystem, das sowohl die Bewegungsgleichungen des Raumflugsystems wie die des Zieles aufnimmt, speichert und hieraus eine zu einem Treffpunkt mit dem Ziel führende Flugbahn errechnet.

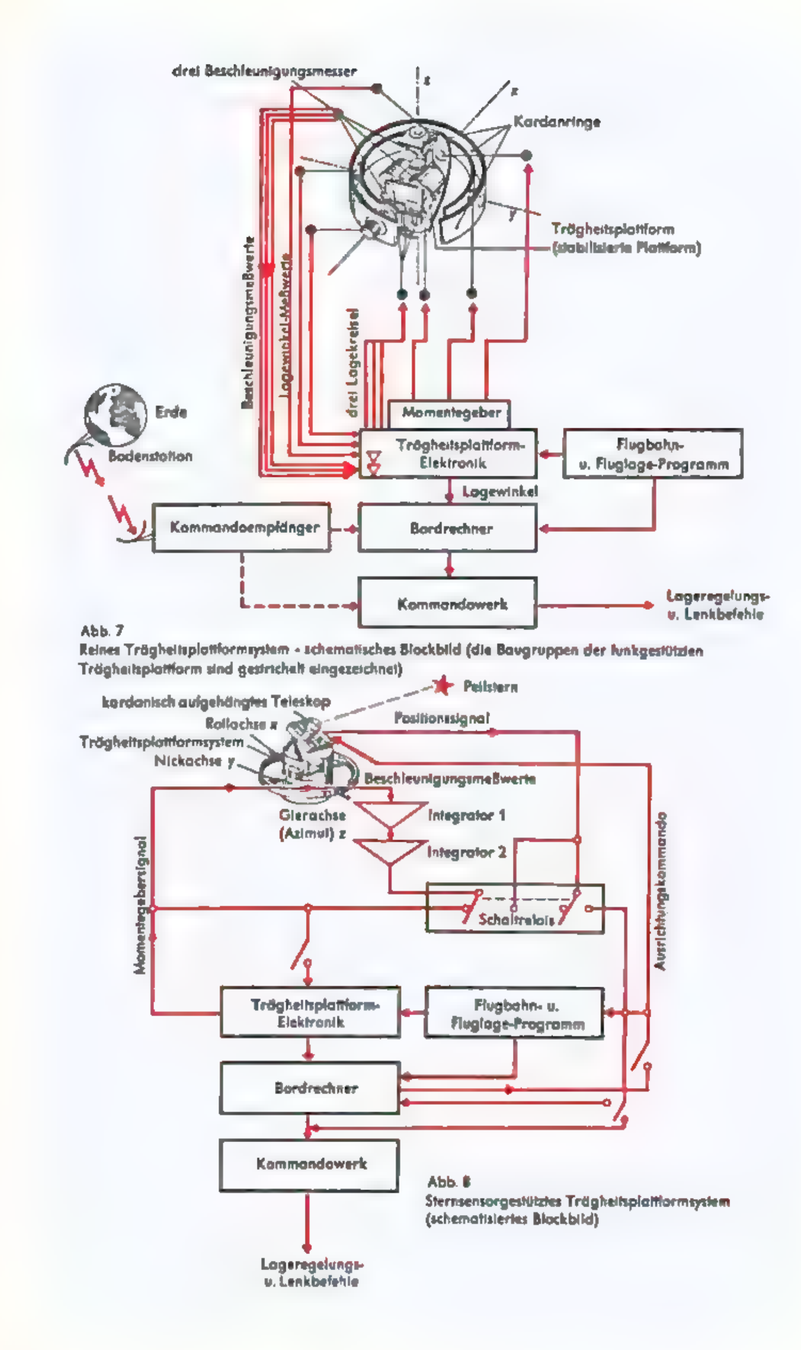


Abb. 7
Reines Trägheitsplattformsystem - schematisches Blockbild (die Baugruppen der funkgestützten Trägheitsplattform sind gestrichelt eingezeichnet)

Abb. 8
Sternsensorgestütztes Trägheitsplattformsystem (schematisiertes Blockbild)

ATMOSPHÄRISCHER WIEDEREINTRITT

Die Atmosphäre umgibt unsere Erde in einer nach oben exponentiell dünner werdenden Schicht. Die kinetische Energie, die ein interkontinentaler Flugkörper oder eine Nutzlast in einer Satellitenkreisbahn besitzt, ist mehrfach größer als diejenige Energie, die zum vollkommenen Verdampfen dieser Nutzlast notwendig wäre. Würde man also keine absolut sicheren Maßnahmen treffen, so müßte jeder Körper, der in die Atmosphäre eintritt, zum größten Teil oder vollkommen verdampfen.
In den USA wurde zunächst versucht, einen Teil der Energie kapazitiv in der Nutzlast aufzunehmen, d. h. die Nutzlast mit einem schweren Schutzschild aus Kupfer zu umgeben. Dieser Weg hat sich als unpraktisch und in den meisten Fällen auch als unwirksam erwiesen. Nach vielen mißglückten Versuchen mit anderen Kühlmethoden wurde schließlich der ablatierende Wiedereintrittskörper entwickelt. Um die Funktionsweise dieser Kühlmethode zu verstehen, ist es zunächst wichtig, den Gang des Wiedereintritts zu verfolgen. Beim Eintritt in die Thermosphäre in etwa 100 km Höhe sind die ersten Anzeichen des sich vergrößernden Luftwiderstandes für einen wiedereintretenden Körper merkbar. Eine wesentliche Erwärmung tritt hier noch nicht auf. Beim Durchfliegen der folgenden Mesopause (geschieht noch in sehr flachem Winkel, nahezu parallel zur Erdoberfläche) tritt eine leichte Erwärmung des Flugkörpers auf; daraufhin wird jedoch in einer Höhe zwischen 40 km und 25 km innerhalb eines Zeitraumes von etwa einer Minute die gesamte kinetische Energie abgebremst. In diesem Bereich treten die größten Belastungen für Raumflugkörper und für die Piloten auf. Diese Tatsache ist sehr wesentlich für die Entwicklung der Wiedereintrittskühlmethode mit Hilfe der Ablation (wörtlich: Abtragung). Belegt man nämlich die Vorderseite des Wiedereintrittskörpers mit einer einige Zentimeter dicken Schicht aus einem schwer brennbaren und schlecht wärmeleitenden Kunststoff, so erhitzt sich durch die Reibung (s. auch S. 14ff.) an der Luft beim Wiedereintritt die Oberfläche dieses Kunststoffes auf mehrere Tausend Grad C und wird flüssig; die Schicht hinter der Stoßfront vor dem Flugkörper erhitzt sich auf etwa 6000 °C, also bis in den plasmatischen Zustand, sie ist gasförmig. Dies hat zur Folge, daß aus der Zwischenschicht zwischen Flüssigkeitsschicht und Gasschicht etwa 80% der umgesetzten Wärmeenergie in Form von Strahlungen an die umgebende Luft abgeführt werden (Abb. 1). Die geringe Leitfähigkeit des noch festen Grundmaterials auf der anderen Seite verhindert, daß ein wesentlicher Teil der Wärme in den Wiedereintrittskörper eindringt. Dies ist möglich aufgrund des sehr kurzen, also nur in der Größenordnung von 50–100 Sekunden andauernden Wiedereintritts. Der Kunststoff wird so mit Verstärkung (z. B. Quarzfasern) gemischt, daß die sehr zähe Flüssigkeitsschicht durch den Strömungsdruck insgesamt nur langsam nach hinten getrieben wird. Auf diese Weise ist es möglich, daß nur einige wenige Prozent der Gesamtenergie auf den Flugkörper selbst übertragen werden. Die Ablationsschicht wird bei einem Wiedereintritt auf diese Weise nur etwa 1 bis 2 cm tief abgetragen.
Selbstverständlich muß auch bei einer guten Ablationskühlung der Wiedereintrittskorridor in bestimmten Grenzen gehalten werden. Wie Abb. 2 zeigt, ist bei zu steilem Eintritt in die Atmosphäre für Flugkörper mit hyperbolischer Geschwindigkeit, also für Flugkörper, die etwa vom Mond oder von einem Planeten zurückkehren, die thermische Belastung beim Wiedereintritt infolge der steilen Flugbahn auch für die Ablationskühlung zu groß. Insbesondere sind dann die Verzögerungen für ein bemanntes Fahrzeug nicht tolerierbar. Ist der Winkel dagegen zu flach, so wird bei hyperbolischer Geschwindigkeit das Raumfahrzeug an der Erde reflektiert, wie etwa ein flacher Stein, den man flach auf eine Wasseroberfläche wirft. Zwischen diesen beiden Extremen liegen optimale Wiedereintrittswinkel zwischen 5 und 10 Grad. Wiedereintrittskörper vom Typ der Gemini- und Apollokapseln sind ablationsgekühlt und können auf Grund ihrer Form auch in begrenztem Maße gesteuert werden.

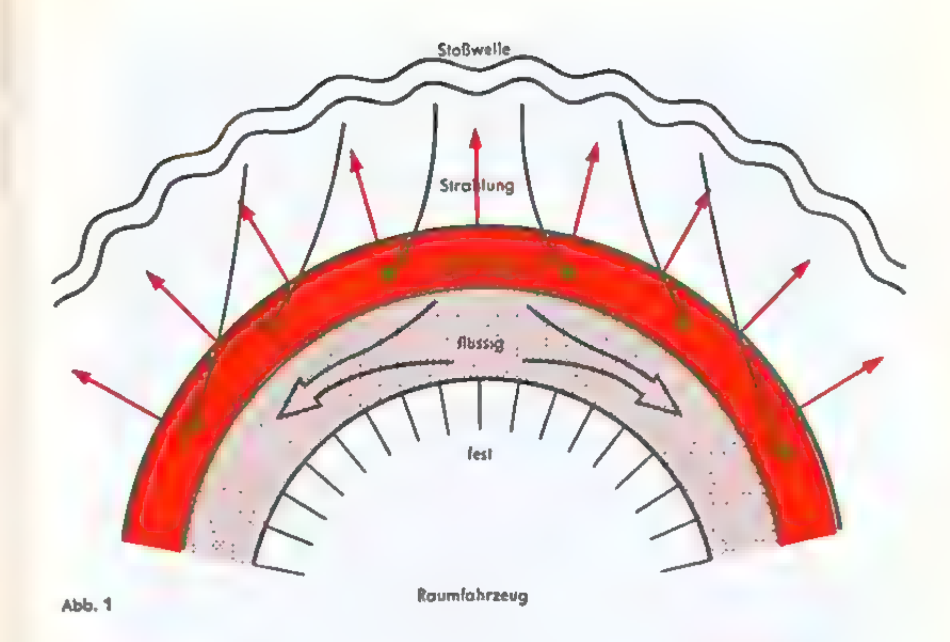


Abb. 1

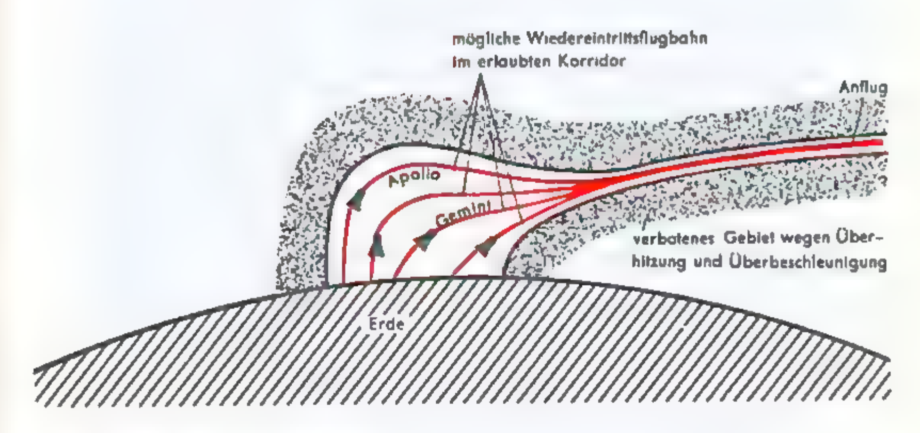


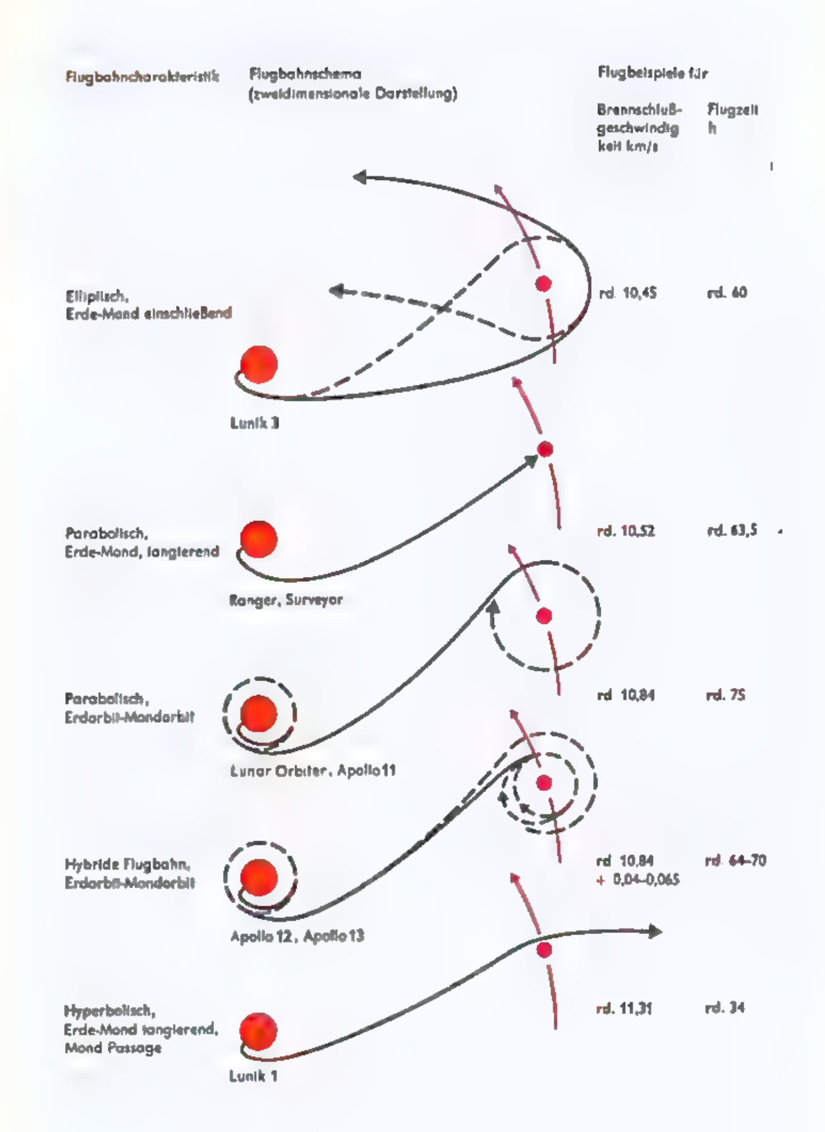
Abb. 2 Eintrittskorridor für Raumflugkörper
Apollo: hyperbolische Geschwindigkeit
Gemini: Kreisbahngeschwindigkeit

MONDFLUG

Der Flug zum Mond, kurz Mondtrajektorie genannt, erfordert neben einer vom Startpunkt abhängigen Mindestgeschwindigkeit ausreichende Kursgenauigkeit der durch die Mindestgeschwindigkeit bestimmten Flugbahn und die Berücksichtigung des himmelsmechanischen Systems Erde-Mond, um nicht nur die Mondbahn zu schneiden, sondern auch mit dem Mond zusammentreffen zu können. Die Mindestgeschwindigkeit hängt einerseits (aufgrund der Gravitationseinflüsse) von der Entfernung des Startorts vom Erdmittelpunkt, andererseits von Bahnform und Bahnwinkel ab. Die erforderliche Mindestgeschwindigkeit entspricht der Brennschlußgeschwindigkeit des Mondflugsystems und liegt in der Nähe der Erdfluchtgeschwindigkeit.

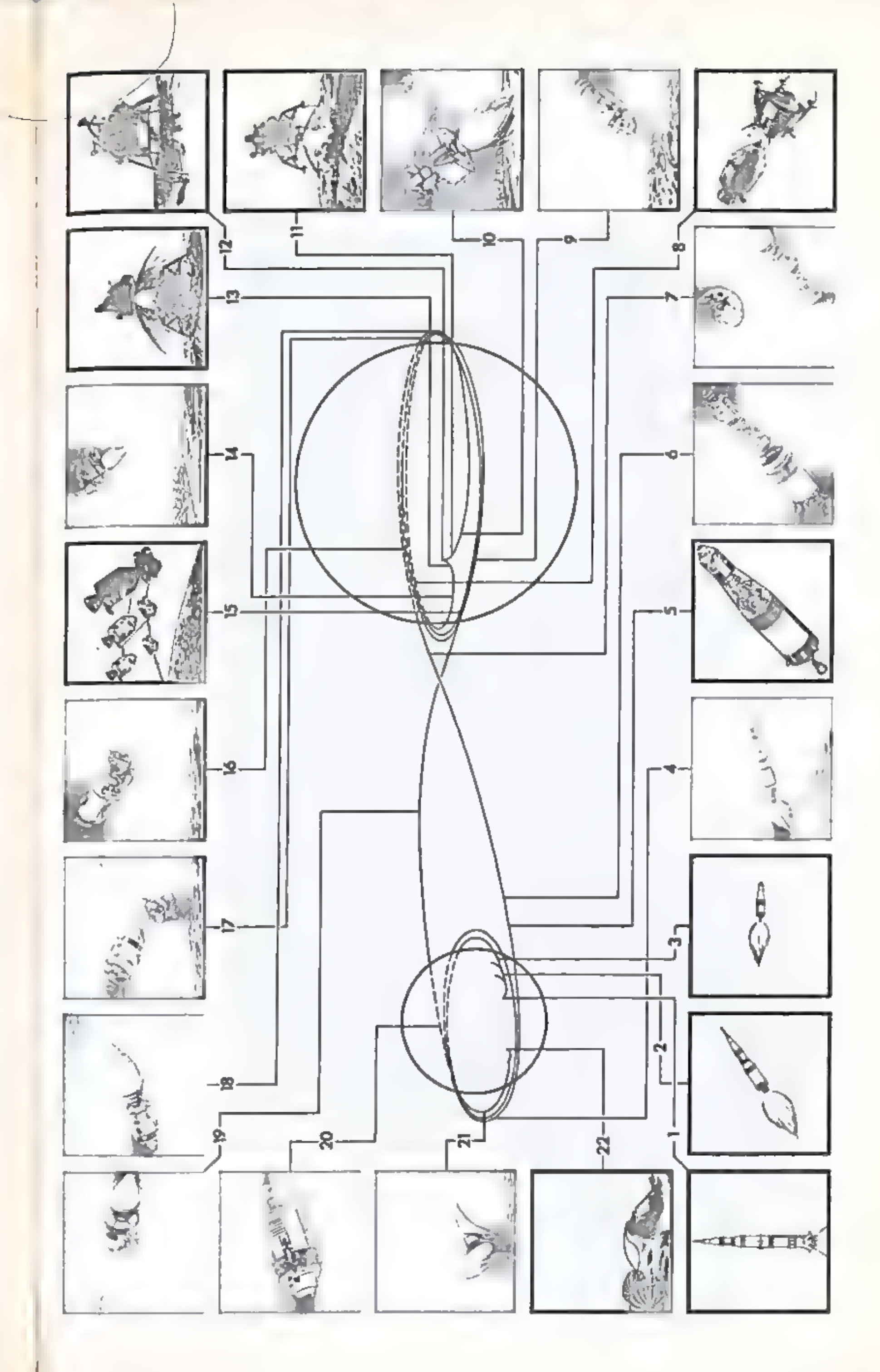
Schematisiert, in vereinfachter zweidimensionaler Darstellung (Abb. 1 bis 5), können fünf Grundformen der Mondtrajektorie nach der Flugbahncharakteristik unterschieden werden. Die Brennschlußgeschwindigkeit dieser Trajektorien bleibt, bis auf die der hyperbolischen, unterhalb der irdischen Fluchtgeschwindigkeit, da die lunare Gravitation mitausgenutzt wird. Die einfachste, Erde und Mond einschließende, Trajektorieform ist eine extrem exzentrische Erdsatellitenellipse, deren Apogäum (Erdferne, vom Erdmittelpunkt aus gemessen) hinter dem Mond liegt. Ein „Mondtreffer" ist mit einer die Mondoberfläche tangierenden oder schneidenden Trajektorie zu erreichen. Er erfordert eine höhere Brennschlußgeschwindigkeit und höhere Kurspräzision (Abb. 2), zwei Voraussetzungen, die durch parabolisch verbundene Erd- und Mondparkbahnen wesentlich verbessert werden können (Abb. 3). Eine hybride Trajektorie (Abb. 4) erfordert für eine höhere Geschwindigkeit (0,04 bis 0,065 km/s) zusätzlichen Treibstoffaufwand, da etwa in der Mitte der ursprünglichen Trajektorie in eine näher an den Mond heranführende Flugbahn eingesteuert wird. Hybride Flugbahnen sind alternativ aus elliptischen, parabolischen und/oder hyperbolischen Teilstücken zusammengesetzt, sie tragen zur Herabsetzung der Gesamtflugzeit bei und ermöglichen ein präziseres Einschwenken in den lunaren Parkorbit. Die schnellste, gleichzeitig aber auch treibstoffaufwendigste Trajektorie zeigt hyperbolische Charakteristik. Sie dient zur Mondpassage mit anschließendem Übergang in eine interplanetare Flugbahn um die Sonne.

Außer nach der himmelsmechanischen Flugbahncharakteristik können Erde-Mond-Trajektorien auch nach der Art des Flugprogramms unterschieden werden: Direktflug Erde-Mond; Start in einer Erdparkbahn mit mehreren Trägerraketen, Rendezvous (z. B. zum Nachtanken) und anschließender Trajektion zum Mond, Direktlandung; Start in einen Geoparkorbit (Erdparkbahn), Trajektion und Rendezvous im Mondorbit; Start in einen Geoparkorbit mit Rendezvous, anschließender Mondtrajektorie und Rendezvous im Mondorbit (z. B. Pendelverkehr zwischen Erd- und Mond-Parkorbit).



APOLLO-MONDFLUG I

Die Mondflüge des Apollo-Programms werden zur Verbesserung der Flugbahngenauigkeit und Treibstoffersparnis von einer erdorbitalen Parkbahn (Erdumlaufbahn) aus auf einer parabolischen oder hybriden Trajektionsbahn, die in einer Flugbahn im Mondorbit mündet, in folgenden charakteristischen Flugphasen durchgeführt (Abb.; alle folgenden Daten nach Apollo 11): Start von der Erde mit dreistufiger Saturn-V-Trägerrakete (1) in einer Synergieaufstiegsbahn (optimale Aufstiegsbahnkurve für Raumfahrtträgerraketen) in eine Parkbahn im Erdorbit; mittels der 1. Stufe mit rund 3875 Mp Schub werden innerhalb von etwa 2,6 Minuten 2,7525 km/s in 66,341 km Höhe, nach Ausbrennen der 1. Stufe mit der 2. Stufe (2) in weiteren 6 min 2 s mit rund 520 Mp Schub 6,9332 km/s in 185,85 km Höhe und mit dem Schub von 104 Mp der 3. Stufe bei der ersten Zündung (3) dann in 188,35 km Höhe nach weiteren 2 min 25 s 7,7914 km/s erreicht. In dieser Parkbahn werden sämtliche Subsysteme (Untersysteme des Raumflugsystems, z. B. Versorgungskabine, Mondlandefahrzeug) einer letzten Kontrolle unterzogen und die Trajektionsbahnparameter unter Berücksichtigung von Parkbahnabweichungen ermittelt. Nach 2 bis 6 Stunden Aufenthalt in der Erdumlaufbahn wird die 3. Stufe zum zweitenmal zur Mondtrajektion gezündet (4); sie beschleunigt in 5 min 43 s das System auf die erforderliche Brennschlußgeschwindigkeit von rund 10,844 km/s in der notwendigen Flugrichtung (in 322,72 km Höhe erreicht). Während einer zehnminütigen Überprüfungsphase der durch Bord- und Bodenrechner ermittelten Trajektionsbahn bereitet die Besatzung die Trennung der Kommando- und Versorgungskabine (CSM) und das anschließende Docking mit dem Mondlandefahrzeug (LM) vor, das durch Öffnen des LM-Hangars, Abwerfen der vier Verkleidungen und Zünden des CSM-Steuertriebwerks eingeleitet wird (5). Nach Abtrennung führt CSM eine 180°-Drehung durch, koppelt mit LM und trennt dieses anschließend nach befriedigender Dockingkontrolle von der 3. Stufe mittels Zündung der Sprengbolzen durch Federkraft. Die 3. Stufe bleibt zurück, während CSM und LM die Mondtrajektorie fortsetzen (6). Während des anschließenden antriebslosen Anfluges auf den Mond werden weitere Systemkontrollen, gegebenenfalls Kurskorrekturen, die Einsteuerung von einer parabolischen auf eine hybride Flugbahn u. a. vorgenommen. Während dieser Flugphase rotiert die CSM-LM-Kombination mit 2 Umdrehungen pro Stunde („Grillkühlung"). Nach Überschreiten der Äquigravisphäre (Erdgravitation gleich Mondgravitation) wird in unmittelbarer Mondnähe die Trajektionsbahn durch Zünden des Haupttriebwerkes entgegen der Flugrichtung und Geschwindigkeitsreduzierung von 2,5 km/s auf 1,6 km/s in einen ersten elliptischen Mondorbit (315 km Apolun, 113,5 km Perilun) überführt (7), der in einer weiteren Manöverphase in einen 113,5-km-Kreisorbit mit 1,553 km/s Orbitalgeschwindigkeit vermindert wird. Nach genauer Vermessung der lunaren Orbitalbahn und damit erfolgter Festlegung des Zündzeitpunktes zum LM-Abstieg wird LM nach erfolgter Überprüfung und Abtrennung (8) aus diesem CSM-Parkorbit (9) zunächst in eine 122 : 102-km-Orbitalbahn eingesteuert, aus der heraus die erste Phase des Abstiegs zur Mondoberfläche auf einer elliptischen Bahn mit tiefstem Bahnpunkt bei rund 14 km Höhe über der Mondoberfläche eingeleitet wird (10).



Diese Bahn erlaubt, sollte Unvorhergesehenes eintreten, auch ohne Triebwerksschub vom tiefsten Bahnpunkt wieder auf CSM-Höhe zu gelangen. Vom Perilun (mondnächster Punkt der Umlaufbahn eines Raumflugkörpers) dieser Übergangsbahn führt das zwischen 476 und 4380 kp schubregulierte Abstiegsstufen-(DS-)Triebwerk LM automatisch bis auf 2300 m Höhe herunter, womit die Bremsphase beendet ist; die Sichteinschwebephase auf das 8 km vorausliegende Zielgebiet beginnt, die bis auf 150 m Höhe und 6 km vor den Zielpunkt führt. Die anschließende Landephase wird manuell (computerkontrolliert!) (11) bis zum Aufsetzen (12) geflogen.
Während des bis zu 45 Stunden ausdehnbaren Mondaufenthaltes werden wissenschaftliche Untersuchungen und Experimente, Mondbodenprobeentnahmen u. a. durchgeführt und die wissenschaftliche Nutzlast aufgebaut.
Die Aufstiegssequenz sieht einen eventuellen Zwischenorbit vor, um das Aufstiegsstufe-(AS-)CSM-Rendezvous in Erdsicht durchführen zu können. Nach dem Computerprogramm wird das AS-Triebwerk für 7 min 15 s gezündet, AS trennt sich von DS (bleibt auf dem Mond zurück; 13). Danach Eintritt in den vorgesehenen elliptischen Orbit mit 17 km Perilun und 87,6 km Apolun (mondfernster Punkt der Umlaufbahn; 14). In einem Apolun-Kickmanöver von 32 s wird die Geschwindigkeit von AS um 14,9 km/s erhöht und damit ein Kreisorbit von rund 88 km „eingestellt", der nur noch 38 km unter dem des CSM liegt. Diese Differenz wird durch Einflug in eine „Anpassungsellipse" und Lage- und Geschwindigkeitskorrekturen bis zum Rendezvous (15) und anschließendes Docking von LM mit CSM abgebaut (16). Mit Hilfe der Translationssteuerdüsen wird hierbei die letzte Entfernungs- und Geschwindigkeitsdifferenz soweit kompensiert, daß in der Endphase beide langsam aufeinander zutreiben und — möglichst antriebslos — koppeln können. Falls das Aufstiegstriebwerk ausfällt, kann auch mit den Steuertriebwerken ein maximal auf 17 Stunden begrenztes Rendezvous-Manöver geflogen werden.
Etwa zwei Stunden nach dem Docking, Umladen, „Entstauben" und Überstieg der LM-Besatzung zur Kommandokabine wird AS abgestoßen. LM verbleibt im Lunarorbit, kann alternativ zur Auslösung seismischer Bewegungen auf dem Mond auf diesen zum Absturz oder mit dem Resttreibstoff in eine planetare Bahn gestartet werden (17). Nach einer ungefähr fünfstündigen Überprüfung der Rückflugsysteme erfolgt computergesteuert die Zündung des 10-Mp-SM-Triebwerks im Funkschatten (etwa beim Durchgang durch den Schnittpunkt der Flugbahn mit der verlängerten Verbindungslinie Erd-Mond-Mittelpunkt); CMS wird während 2 min 29 s um 988 m/s auf 2,58 km/s in Richtung Erde (18) beschleunigt. Während der durch die Erdgravitation beschleunigten Rückreise in 59 Stunden 55 Minuten (Hinflug 75 h 49 min 3 s) werden sechs Plattformjustierungen und Navigationsmessungen, Fluglage- und Kurskorrekturen (19) durchgeführt, Korrekturdaten in den Computer eingegeben und die Anpassung der Ist- an die Sollflugbahn zur Erreichung des günstigsten Eintrittswinkels in die Atmosphäre vorbereitet. Dieser Wiedereintrittswinkel soll etwa 6,5° unter der örtlichen Horizontalen (mit einer Toleranz von 2°) im Flugbahnperigäum betragen und ergibt damit einen „Eintrittskorridor" mit nur 48 km Hochachse, der über rund 380 000 km zu treffen ist (ohne die Möglichkeit eines zweiten Versuchs).

Nach einer letzten Systemkontrolle wird dann CSM in eine Fluglage gesteuert, die der Versorgungskabine (SM) einen steileren Eintrittswinkel nach der SM-Abtrennung gibt (20). Die Kommandokabine (CM) wird so in die Eintrittsfluglage manövriert, daß der Hitzeschutzschild in Flugrichtung weist (21), die pyrotechnischen Fallschirmauswurfvorrichtungen werden betriebsbereit gemacht. Der eigentliche Wiedereintritt in die Atmosphäre erfolgt in 120 km Höhe mit etwa 10,95 km/s (rd. 39 500 km/h). Hierbei treten am Hitzeschild Temperaturen bis zu 2800° C auf. Etwa 1 min 22 s nach Wiedereintritt wird die maximale Bremsverzögerung mit 6,6 g erreicht. Zwischen der achtzehnten Sekunde nach Wiedereintritt bis zur Unterschreitung der Hyperschallgeschwindigkeit befindet sich die Raumkabine im radiotechnischen Blackout, da die Luftionisation als Folge der Reibungsaufheizung jegliche Funkverbindung unterbricht. Neun Minuten nach Wiedereintritt werden zwei 5-m-Stabilisierungsfallschirme, eine Minute später drei Vorfallschirme, die ihrerseits je einen 25-m-Hauptfallschirm zur Entfaltung bringen, ausgestoßen. Die Wasserung (auch Landung ist mit Apollo-Kabinen möglich) erfolgt etwa 5 Minuten später, wobei die Fallschirme automatisch gekappt werden und die Kabine durch aufblasbare Luftsäcke in eine stabile Schwimmlage gebracht wird (22). Die Bergung der Astronauten und der Kabine erfolgt durch eine Bergungsflotte mit Hubschraubern.
Um den Aufwand des Apollo-Saturn-V-System-Verfahrens zu vermindern, sind Mond-Pendelverkehrssysteme in der Entwicklung, deren optimale Form einen Einsatz von rückkehrfähigen, wiederverwendbaren Raumtransportern für den Verkehr Erde-Parkorbit mit Rendezvous vorsieht. Für den Verkehr zwischen den Parkbahnen im Erd- und Mondorbit kommen Raumflugsysteme mit chemothermischen, später auch elektrischen Triebwerken in Frage; der Verkehr zwischen Mondorbit und Mondoberfläche wird mittels Mondlandefahrzeugen abgewickelt.

Allgemeines: Die Großraumwetterforschung wurde durch die Wettersatelliten z. B. Nimbus und Itos (beide USA), Kosmos und Meteor (UdSSR) entscheidend verbessert. Die Nachrichtensatelliten z. B. Molnija (UdSSR), Intelsat (USA) und Skynet (Großbritannien) bilden einen neuen Zweig der drahtlosen Übertragungstechnik für Nachrichten von Ort zu Ort auf der Erde. Die wissenschaftliche Erforschung des Weltraums wurde mit den Sonden der Ranger- und Mariner-Reihe (USA) und der Lunik-Reihe (UdSSR) eingeleitet. Wettersatelliten und Weltraumsonden nehmen im Weltraum Informationen auf und geben sie auf dem Funkwege an die Stationen auf der Erde weiter; Nachrichtensatelliten leiten nur Nachrichten weiter.

Allen drei Flugkörpergruppen ist gemeinsam: Sie sind unbemannt, ihr Abschuß erfolgt mittels Trägerraketen (vgl. Abb. 1), die Energieversorgung geschieht über Akkumulatoren, die von Sonnenzellen aufgeladen werden (Abb. 2 u. 5a). Alle drei Gruppen erlauben die Meßdatenübertragung (Telemetrie) über die Verhältnisse an Bord und im umgebenden Weltraum (Temperatur, Strahlung, Magnetfeld usw.) zur Bodenstation und haben Kommandoempfangsstellen (Abb. 2a), z. B. zur befohlenen Kurskorrektur (Fernwirkeinrichtung) mittels Steuerdüsen; häufig ist auch die automatische Bahnsteuerung (Tracking) mittels Sensoren („Fühlern") für die Sonnenposition oder nach Leitsternen (bekannt der Stern Kanopus im Sternbild der Karina). Meist ist die Bahn des Flugkörpers programmiert (vorbestimmt), so daß nur der Unterschied zwischen den telemetrischen wahren Bahndaten und dem Programm zur Kursberichtigung benutzt werden muß.

Die entsprechenden Bodenstationen sind nach einem bestimmten Schema (Abb. 2b) aufgebaut. Ihr weitaus wichtigster Teil ist eine Hochleistungsantenne (Abb. 3), mit einem Gewinn von 60 dB (einmillionenfach) zum Empfang der schwachen aus dem Weltraum eintreffenden Signale. Sie wird dem Satelliten bis auf etwa $^1/_{1000}{}^\circ = 3{,}6''$ (Bogensekunden) nachgeführt, da die Halbwertsbreite ihres Aufnahmediagramms nur $0{,}2^\circ = 720''$ beträgt. Nachgeschaltet ist ein Verstärker mit geringem Eigenrauschen, ein Maser, der unter Ausnutzung atomarer Prozesse auf bewegte Elektronen verzichtet und eine Rauschverbesserung von 16 dB (80fach) bewirkt.

Besondere elektronische Ausrüstung:

Wettersatelliten sollen vor allem laufend Wolkenbilder (Abb. 4, S. 675) an die Bodenstationen liefern, daneben einfache Fernmeßdaten z. B. über Temperaturverhältnisse. In einer Fernsehkamera wird eine Vidikonröhre (vgl. S. 322) mit einer sehr beständigen Speicherplatte für die Aufnahmen 40 ms (1/25 s) belichtet und das entsprechende Ladungsbild mit einer Auflösung in 800 Zeilen in 200 s abgetastet. Es sind 800×800 = 640 000 Bildpunkte in 200 s zu übertragen, die benötigte Bandbreite beträgt 1 600 Hz, die Senderfrequenz 136 MHz, die Leistung 5 W; der Empfangsantennengewinn ist etwa 12. Es genügen Wendelantennen, die in den Hauptwetterdienststationen eines Landes aufgestellt werden (Masergeräte sind nicht notwendig). Der Abstand des Satelliten von der Erde beträgt zwischen 900 und 2 500 km; die Vorbereitungs- und Löschzeit zwischen zwei Bildern dauert 8 Sekunden, so daß nach 208 Sekunden eine neue Aufnahme gemacht werden kann.

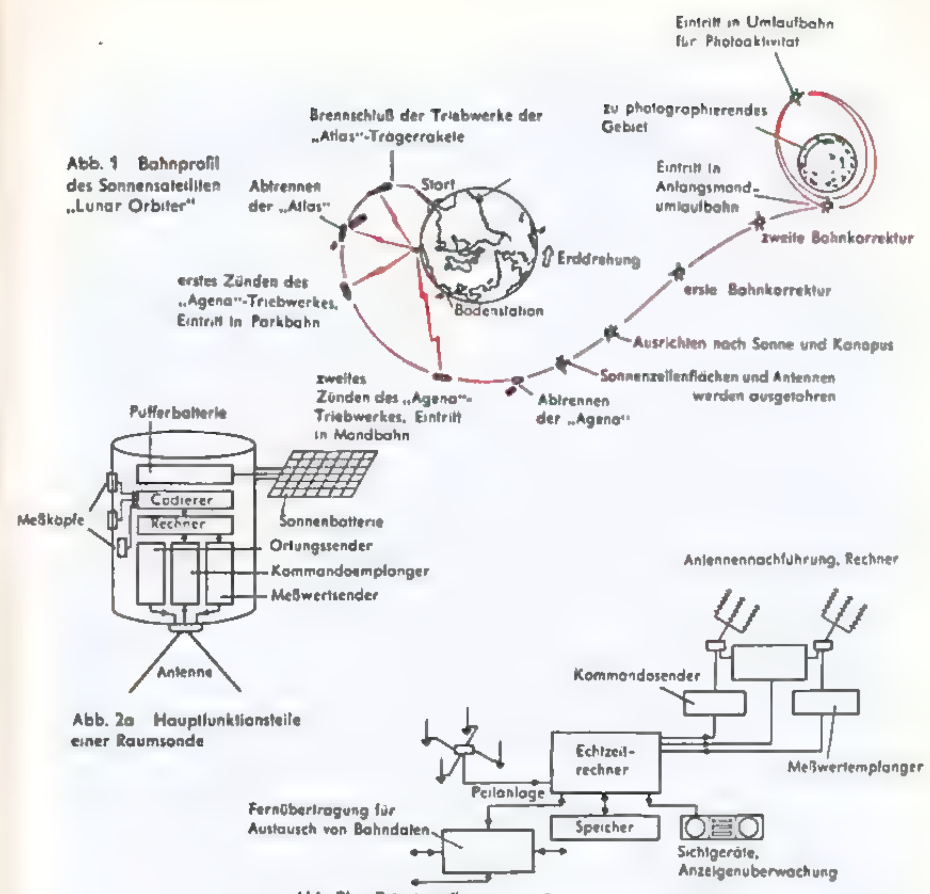


Abb. 1 Bahnprofil des Sonnensatelliten „Lunar Orbiter"

Abb. 2a Hauptfunktionsteile einer Raumsonde

Abb. 2b Prinzipaufbau einer Bodenanlage für die Steuerung des Raketenstarts einer Raumsonde und die Meßwertübertragung von der Sonde zum Boden

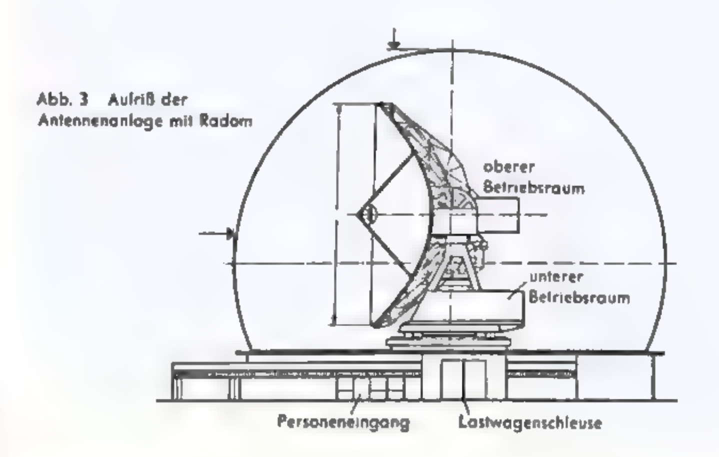


Abb. 3 Aufriß der Antennenanlage mit Radom

RAUMSONDEN, SATELLITEN II

Raumsonden: Die Mondsonden der Ranger-Serie hatten die Aufgabe, die Oberfläche des Mondes aus möglichst geringem Abstand (minimal 305 m vor dem Aufschlagen) in möglichst guter Qualität fernsehmäßig aufzunehmen und zur Erde zu übertragen. Die drei Sonden lieferten über 17000 Bilder, zum Teil mit einer um das tausendfache besseren Auflösung gegenüber der Mondphotographie mit Fernrohren. An Bord befinden sich zwei Vollbildkameras für 1125 Zeilen und einer Abtastzeit von 2,5 s. Die Speicherplatte der Spezialvidikonröhre wurde jeweils 4 ms ($\frac{1}{250}$ s) belichtet, die Vorbereitungszeit mit Löschung betrug ebenfalls 2,5 s. Beide Kameras arbeiteten abwechselnd. Benötigte Bandbreite $\frac{1}{2} \times 1125 \times 1125 \times \frac{1}{2{,}5} = 253$ kHz, Senderfrequenz 960 MHz, Leistung 60 W. Die Signale wurden mit einer 28-m-Parabolantenne empfangen (auf Magnetband) und auf 35-mm-Film mit einer Fernsehbildröhre sowie auf Polaroidfilm aufgezeichnet. Vier weitere Kameras lieferten Bildausschnitte, die mit 282 Zeilen in 200 ms abgetastet wurden; Belichtungszeit 2 ms ($\frac{1}{500}$ s), Bandbreite 200 kHz. Die Aufnahmedauer der sechs Kameras erstreckte sich nur auf die letzten 20 Minuten des Fluges vor dem Aufschlag.

Die Marssonde Mariner 4 (Abb. 5) hat 21 Fernsehbilder im Abstand von 10000 km vom Planeten Mars aufgenommen und diese über 220000000 km mit einer Senderleistung von nur 10 W auf 2,36 GHz übertragen. Am 14. 7. 1965 wurden mit einer Vidikonkamera die Aufnahmen durchgeführt. Belichtungszeit 200 ms ($\frac{1}{5}$ s), in 200 Zeilen Auflösung in 24 s abgetastet, so daß sich aus 40000 Bildpunkten eine Bandbreite von 833 Hz ergab. Jedem der 40000 Bildpunkte wurde eine von 64 möglichen Helligkeitsstufen in einem Analogdigitalwandler zugeordnet und diese in binärer Form auf einem Magnetband mit 33 cm/s Umlaufgeschwindigkeit gespeichert; das entspricht 256000 bits (Impulsen) in 24 s oder 10700 bits/s oder 5350 Hz Bandbreite. Beim „Überspielen" zur Erde wird aber die Abtastgeschwindigkeit des Bandes auf 0,25 mm/s herabgesetzt, d. h. um den Faktor 1320, so daß nur $8\frac{1}{3}$ bits/s (4 Hz Bandbreite) übertragen werden und die benötigte Zeit auf 1320×24 s $= 31600$ s oder 8 Stunden 48 Minuten für ein einziges Bild ansteigt. Am Boden werden die Zeichen auf einem Magnetband gespeichert, dekodiert, zur Helligkeitssteuerung einer Fernsehbildröhre benutzt, die einen 35-mm-Film Punkt für Punkt belichtet.

Auf gleicher technischer Höhe wie die Nachrichtenübertragung bewegen sich die Telemetrie- und Kommandoeinrichtungen, insbesondere das Vierfach-Navigationssystem mit Sensoren für Sonne, Erde, Mars und den Leitstern Kanopus.

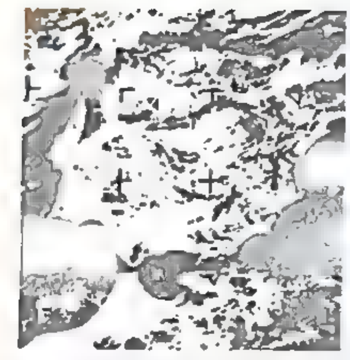


Abb. 4 Iberische Halbinsel, vom Wettersatelliten „Nimbus-A" aus 900 km Höhe aufgenommen und in München empfangen

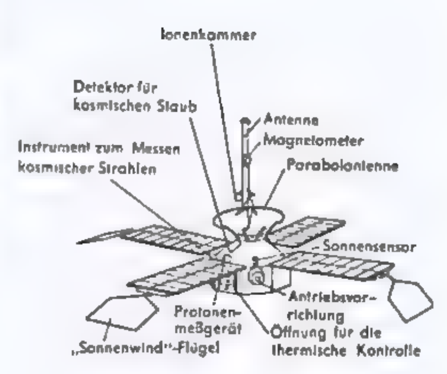


Abb. 5a

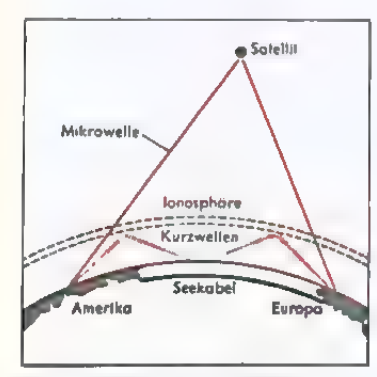


Abb. 6 Tiefseekabel, Kurzwellenfunk und Satellitenfunk als weltweite Nachrichtenwege

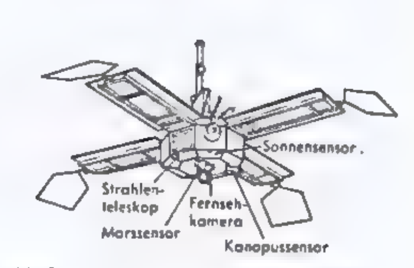


Abb 5b Einzelheiten der Marssonde „Mariner IV"

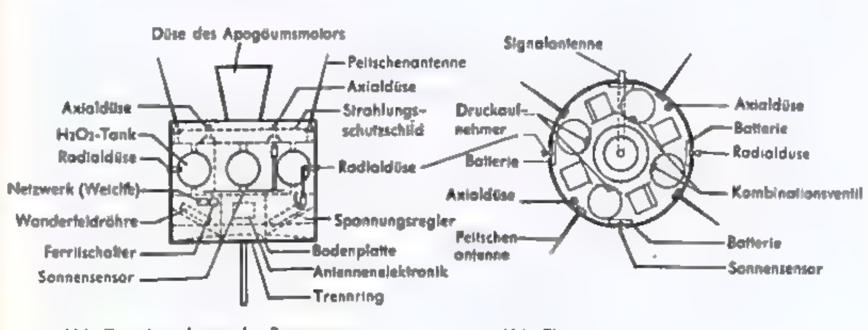


Abb. 7a Anordnung der Baugruppen in einem Satelliten von der Seite . . .

Abb. 7b . . . und von hinten gesehen

RAUMSONDEN, SATELLITEN III

Nachrichtensatelliten sind Relais-(Verstärker-)Stationen im Übertragungsweg Bodenstation I–Satellit–Bodenstation II (Abb. 6, S. 675). Sie werden eingesetzt, wenn die anderen Systeme ihre Leistungsgrenze erreicht haben, insbesondere im Hinblick auf die Bandbreite, die z. B. für ein Fernsehprogramm 5 MHz beträgt (gleichwertig mit 1250 Fernsprechkanälen!). Die Elektronik eines Satelliten dieser Art (Abb. 7, S. 675) zeigt äußerlich eine Signalantenne und mehrere Telemetrieantennen, die nach Abb. 8 so mit dem Sender und Empfänger zusammengeschaltet sind, daß sich ein Frequenzumsetzer von 6,39 GHz auf 4,16 GHz bei gleichzeitiger Leistungsverstärkung um den Faktor $0{,}6 \cdot 10^{-12}$ oder 118 dB ergibt.

Die Elektronik der zugehörigen Bodenstation (Abb. 9) besteht aus dem 6,39-GHz-Sender, der vom Videosignal frequenzmoduliert wird. Seine Ausgangsleistung von 2 kW wird über einen Diplexer der großen Parabolantenne zugeführt und durch deren Bündelung in der Strahlungskeule auf 2000000 kW verstärkt. Auf dem Weg zum Satelliten wird das Signal um den Faktor 10^{20} (200 dB) geschwächt, so daß an der Satellitenantenne eine Leistung von 20 pW $= 20 \cdot 10^{-12}$ W steht.

Noch eindrucksvoller ist der Empfangsteil der Bodenstation. Der Satellit strahlt 12 W auf 4,16 GHz ab. Auf dem Weg zur Erde tritt eine Schwächung um den Faktor 5×10^{19} ein, an der Empfangsantenne steht eine Leistung von $2{,}4 \cdot 10^{-19}$ W. Ihr Gewinnfaktor von 1000000 (60 dB) erhöht die Eingangsleistung auf $2{,}4 \cdot 10^{-13}$ W, d. h. 18mal weniger als am Satellitenempfänger. Hier muß ein Maserverstärker mit seiner sehr niedrigen Rauschzahl wie bei den Weltraumsonden verwendet werden.

Satelliten dieser Art werden auf eine kreisförmige Umlaufbahn im Abstand von rd. 35800 km von der Erde gebracht und auf gleicher Umlaufszeit wie die Erde gehalten, so daß sie scheinbar über der Erde stillstehen, d. h. mit ihr synchron umlaufen. Solche Synchronsatelliten haben den Vorteil, daß ein unterbrechungsfreier ganztägiger Funkverkehr möglich ist (Vorteil gegenüber Vorläufern wie z. B. Telstar in erdnäheren Bahnen). Die große Höhe der Synchronsatelliten verlängert die Laufzeit eines gesprochenen Wortes zum Hörer auf etwa 0,3 s (100000 km Weg), so daß bei derartigen Gesprächen eine gewisse Sprechdisziplin notwendig ist. Ein Synchronsatellit kann etwa 120 Breitengrade „überblicken“. Mindestens drei solcher Synchronsatelliten sind zu einer vollständigen Überdeckung der Erdoberfläche mit Funkverkehr erforderlich.

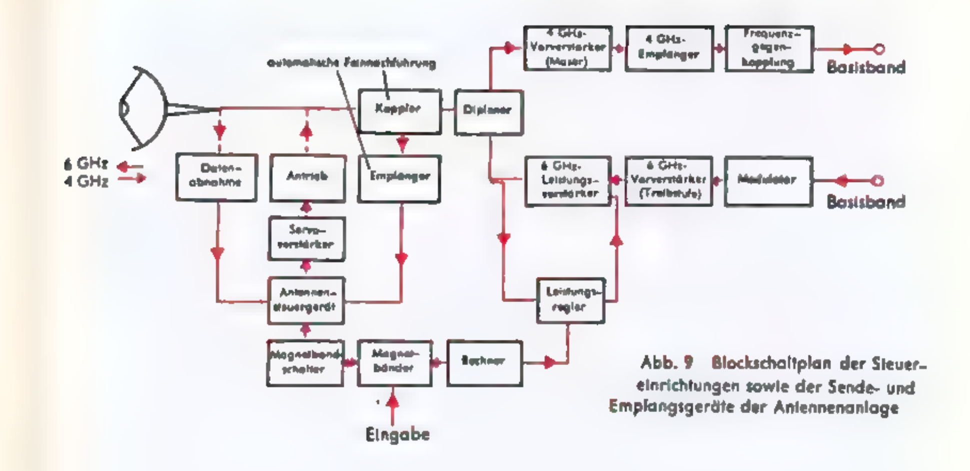


Abb. 9 Blockschaltplan der Steuereinrichtungen sowie der Sende- und Empfangsgeräte der Antennenanlage

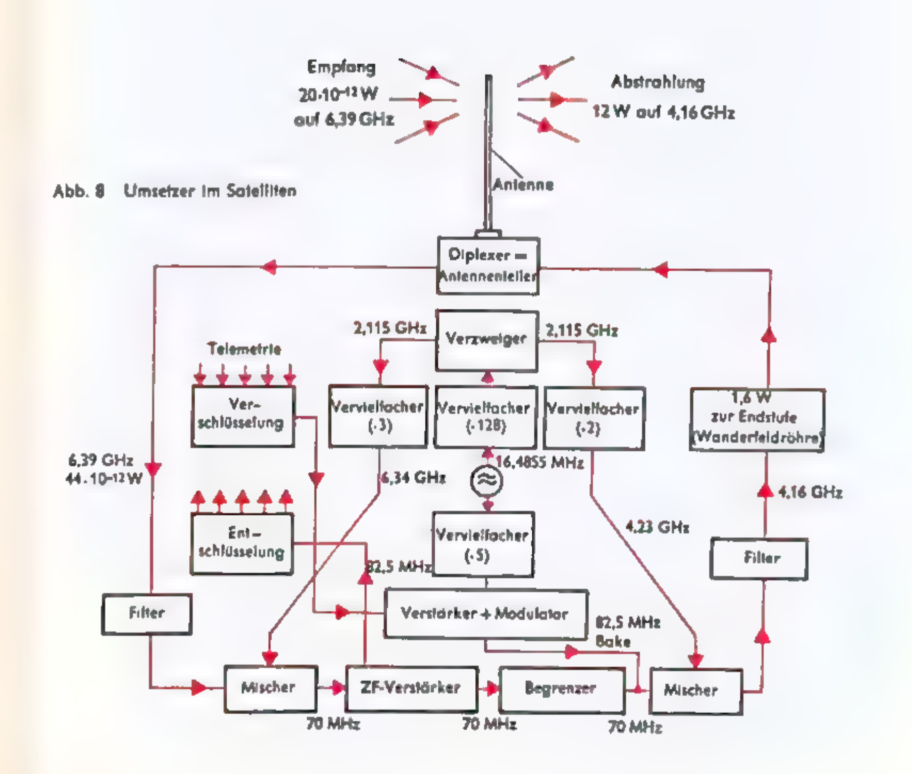


Abb. 8 Umsetzer im Satelliten

RAUMANZUG, RAUMKABINE

Im nahezu absoluten Vakuum des Weltraumes, ausgesetzt auch den gefährlichen Einflüssen von kosmischer Strahlung, Sonnenwinden, Meteoriten und extremen Temperaturen, befindet sich der Mensch in einer lebensfeindlichen Umgebung. Es ist daher notwendig, daß er sich die irdische Umgebung, was die Versorgung mit lebenswichtigen Stoffen betrifft, in den Raum mitnimmt. Dies geschieht grundsätzlich mit doppelter Sicherheit, d. h. in doppelter Ausführung. Erstens werden die Astronauten mit einem Raumanzug ausgerüstet. Darin werden dem Astronauten Sauerstoff zugeführt und Wärme und Luftfeuchtigkeit abgeführt. Außerdem werden sämtliche lebenswichtigen Meßdaten seines Organismus wie Blutdruck, Herztätigkeit, Temperaturen und andere Meßdaten automatisch durch geeignete Meßfühler aufgenommen und über Funk den in den Bodenstationen auf der Erde sitzenden Ärzten zur Überwachung mitgeteilt. Ausgerüstet mit diesem an sich schon autonomen Raumanzug befindet sich der Astronaut noch einmal innerhalb einer völlig klimatisierten Raumkapsel, die er nur zur Erfüllung besonderer Aufgaben verläßt. Eine solche Raumkapsel ist ebenfalls mit einem kompletten Lebensunterhaltssystem ausgerüstet. Ein typisches Beispiel hierfür ist das Lebensunterhaltssystem der Apollo-Kapsel für den bemannten Mondflug. Bezüglich der menschlichen Abfälle ist dieses System noch offen wegen der kurzen Zeit des Fluges zum Mond und zurück, der insgesamt etwa acht Tage in Anspruch nehmen wird. Bei längeren Raumflugmissionen, wie sie z. B. die bemannte Außenstation oder ein bemannter Flug zu einem unserer Nachbarplaneten sind, wird ein geschlossener Kreislauf nach Abb. 2 notwendig. Aus Gewichtsgründen werden auch die menschlichen Abfälle dehydriert und das so gewonnene Wasser wieder in den Kreislauf zurückgeführt. Diese Maßnahme erscheint zunächst vom hygienischen Standpunkt aus unangenehm. Das gewonnene destillierte Wasser ist jedoch chemisch vollkommen rein und kann den Menschen oftmals durchlaufen.

Die Wände von Raumkapseln und Raumanzug sind mehrschichtig aufgebaut. Ein wesentlicher Bestandteil der Haut eines Raumanzuges ist eine Kunststoffschicht, die mit Metall bedampft ist (Aluminium oder Gold), um die intensive Sonnenstrahlung zu reflektieren. Auf diese Weise wird eine Überlastung des Wärmeabfuhrsystemes des Raumanzuges vermieden. Abb. 1 zeigt am Beispiel der Mercury-Raumkapsel, welchen wesentlichen Anteil am Gesamtinhalt einer Raumkapsel das Lebensunterhaltssystem zur Versorgung der Kapsel selbst und zur Versorgung des Raumanzuges des Astronauten in Anspruch nimmt. Bequemer werden es schon die Apollo-Astronauten und die Besatzungen der bemannten Erdaußenstationen großer Bauart haben. Aufgrund der fortgeschrittenen Technologie ist es hier möglich, auf das dauernde Tragen eines autonomen Raumanzuges innerhalb der Kapseln bzw. Stationen zu verzichten. Dies ist möglich aufgrund einer doppelwandigen Ausführung dieser Stationen mittels gummiartiger Zwischenschichten, die beim Einschlagen oder Durchschlagen von Meteoriten sich von selbst wieder schließen und so ein plötzliches Absinken des Innendruckes der Station verhindern.

Ein besonderes Problem stellte bisher die Auswahl der Kabinenatmosphären dar. Die natürliche Zusammensetzung unserer Atemluft ist, abgesehen von einigen geringfügigen Bestandteilen, zu 20% Sauerstoff und zu 80% Stickstoff. Da bei allen Raumfahrtsystemen immer Gewicht gespart werden muß, stellt sich selbstversändlich die Frage, ob die Lüftung der Kabinen mit reinem Sauerstoff bei entsprechend verringertem Kabinendruck unschädlich für den Menschen ist. Ebenso wurde die Möglichkeit untersucht und angewandt, den Stickstoff durch das wesentlich leichtere Helium zu ersetzen. Dies ist eine für den Lebensunterhalt im Raum sehr wichtige Frage, die nicht zuletzt auch die Rentabilität von Außenstationen, etwa auf dem Mond oder auf Planetoiden oder Planeten, bestimmt.

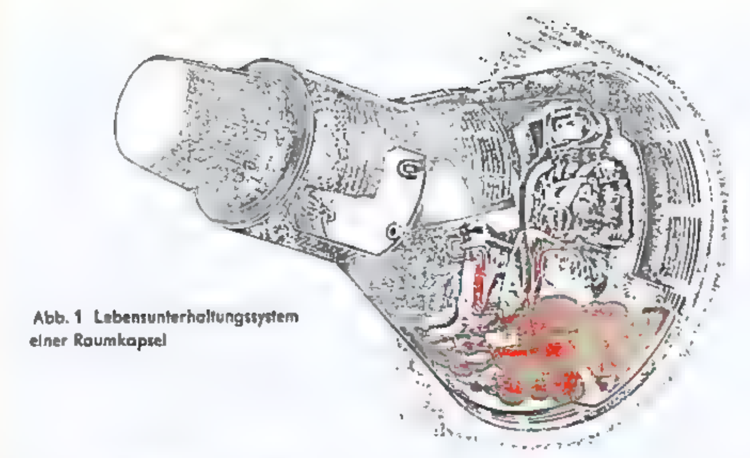


Abb. 1 Lebensunterhaltungssystem einer Raumkapsel

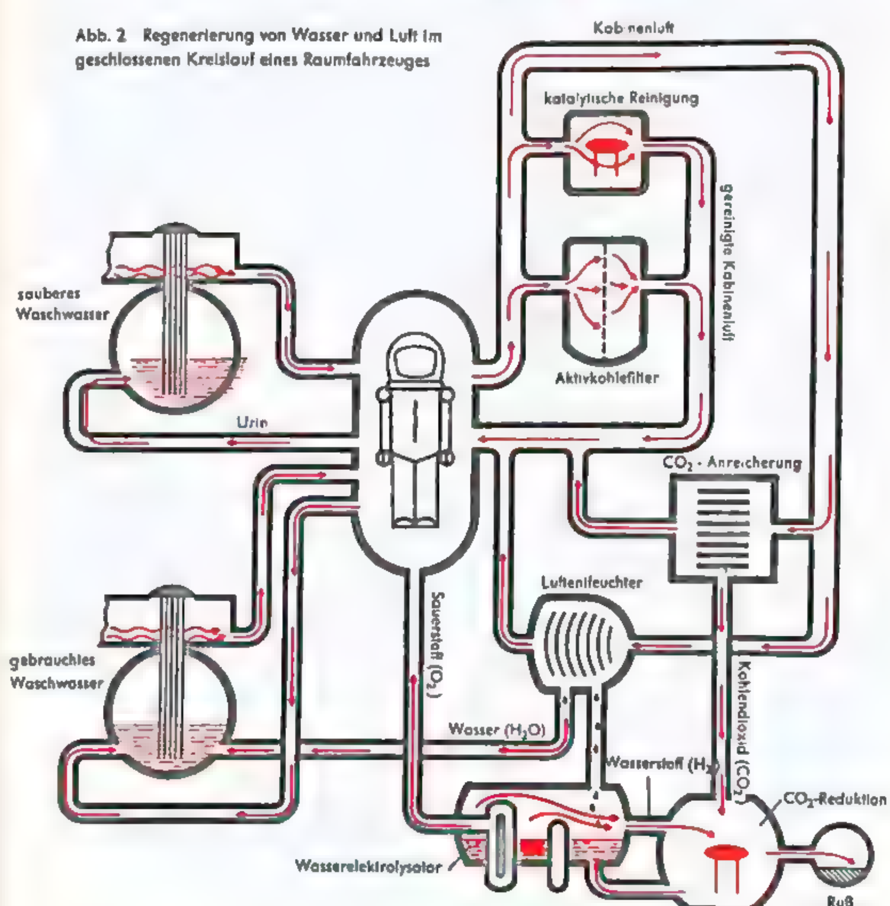
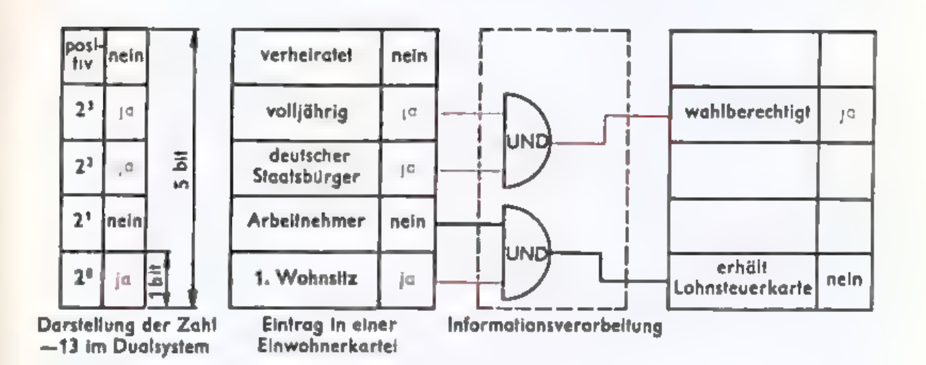


Abb. 2 Regenerierung von Wasser und Luft im geschlossenen Kreislauf eines Raumfahrzeuges

GRUNDLAGEN DER INFORMATIONSVERARBEITUNG I

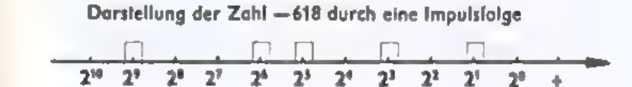
Information ist die mathematisch-technische Bezeichnung für den Inhalt einer Beschreibung oder Nachricht. Sie kann sich auf sehr verschiedenartige Objekte beziehen, z. B. auf die Größe einer Zahl, auf den Wohnsitz eines Menschen oder irgendeinen anderen Sachverhalt. Aus Informationen können Schlüsse gezogen werden. So folgt aus den Informationen „A ist volljährig" und „A ist deutscher Staatsbürger" aufgrund des Wahlgesetzes die Information „A ist wahlberechtigt". Dieses Aussondern der interessierenden Informationen nennt man Informations- oder Datenverarbeitung. Sind viele Informationen nach den gleichen Regeln zu verarbeiten, so kann dies maschinell geschehen. Für ein begrenztes Sachgebiet ist jede Beschreibung durch eine Anzahl von Fragen, die mit „Ja" oder „Nein" beantwortet sind, ersetzbar (Dualsystem). Nach einem solchen Verschlüsselungsschema (Code) kann Information technisch dargestellt und gespeichert werden. Dazu sind Bauelemente mit zwei leicht unterscheidbaren Zuständen notwendig. Je nach der Geschwindigkeit, mit der „Ja"- und „Nein"-Zustände eingeschrieben und wieder abgefragt werden sollen, benutzt man gelochte Karten, Papierstreifen, Magnetbänder, magnetisierte Eisenkerne, Magnettrommeln, Röhren und Transistoren sowie elektrische Impulse zur technischen Darstellung der Information. Die Informationseinheit 1 *bit* ist die in einer Entscheidung zwischen „Ja" und „Nein" enthaltene Information. In einer Maschine werden meist mehrere *bit*-Informationen zu einem Maschinenwort zusammengefaßt. Die zugehörigen Speicherelemente bilden eine Speicherzelle. Zellen zur kurzzeitigen Speicherung eines Maschinenwortes während seiner Verarbeitung heißen auch Register. Verarbeitung von Information bedeutet, daß aus dem Inhalt eines oder mehrerer Register nach bestimmten Regeln ein neues Maschinenwort gebildet wird. Dazu sind sog. Verknüpfungsschaltungen notwendig. Man kann zeigen, daß alle nur denkbaren Regeln zur Informationsverarbeitung aus wenigen einfachen Verknüpfungen wie z. B. „UND", „ODER" und „NEGATION" aufgebaut werden können. Im obigen Beispiel genügt zur Feststellung der Wahlberechtigung aus einer Einwohnerkartei auf Lochkarten eine einfache „UND"-Schaltung. Sie liefert nur dann am Ausgang ein „Ja", wenn an beiden Eingängen ein „Ja" vorliegt. Eine Schaltung, die den Inhalt einer bestimmten Speicherzelle als Zahl im Dualsystem zum Inhalt eines Registers addiert, ist wesentlich komplizierter, sie läßt sich jedoch aus einfachen Verknüpfungsschaltungen kombinieren. Für eine rein mechanisch arbeitende Rechenmaschine ist dieses Prinzip unrationell. Es wird nur für Maschinen, die mit Relais oder mit Röhren und Transistoren arbeiten, benutzt. Man baut Schaltungen für die häufigsten Verknüpfungen (Rechenoperationen) fertig ein. Komplizierte Informationsverarbeitungen (wie z. B. längere Zahlenrechnungen) können aus diesen „Grundbefehlen" zusammengesetzt werden. Eine programmgesteuerte Anlage führt Befehle in der Reihenfolge aus, in der sie in aufeinanderfolgenden Zellen ihres Speichers oder auf einem Lochstreifen stehen.

Zerlegung verschiedenartiger Informationen in elementare Aussagen:

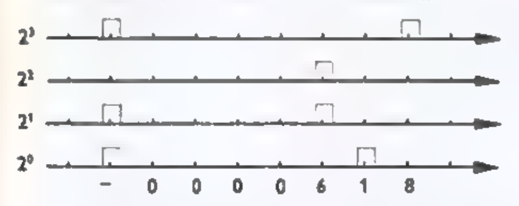


Darstellung der Zahl −13 im Dualsystem — Eintrag in einer Einwohnerkartei — Informationsverarbeitung

Darstellung der Zahl −618 durch eine Impulsfolge



Darstellung der Zahl −618 durch vier parallel laufende Impulsfolgen.
Das Zeichen „+" ist mit „12", das Zeichen „−" mit „11" verschlüsselt.



Elementare logische Verknüpfungen und dafür übliche Symbole:

A	B	C
nein	nein	nein
ja	nein	nein
nein	ja	nein
ja	ja	ja

A	B	C
nein	nein	nein
ja	nein	ja
nein	ja	ja
ja	ja	ja

A	C
nein	ja
ja	nein

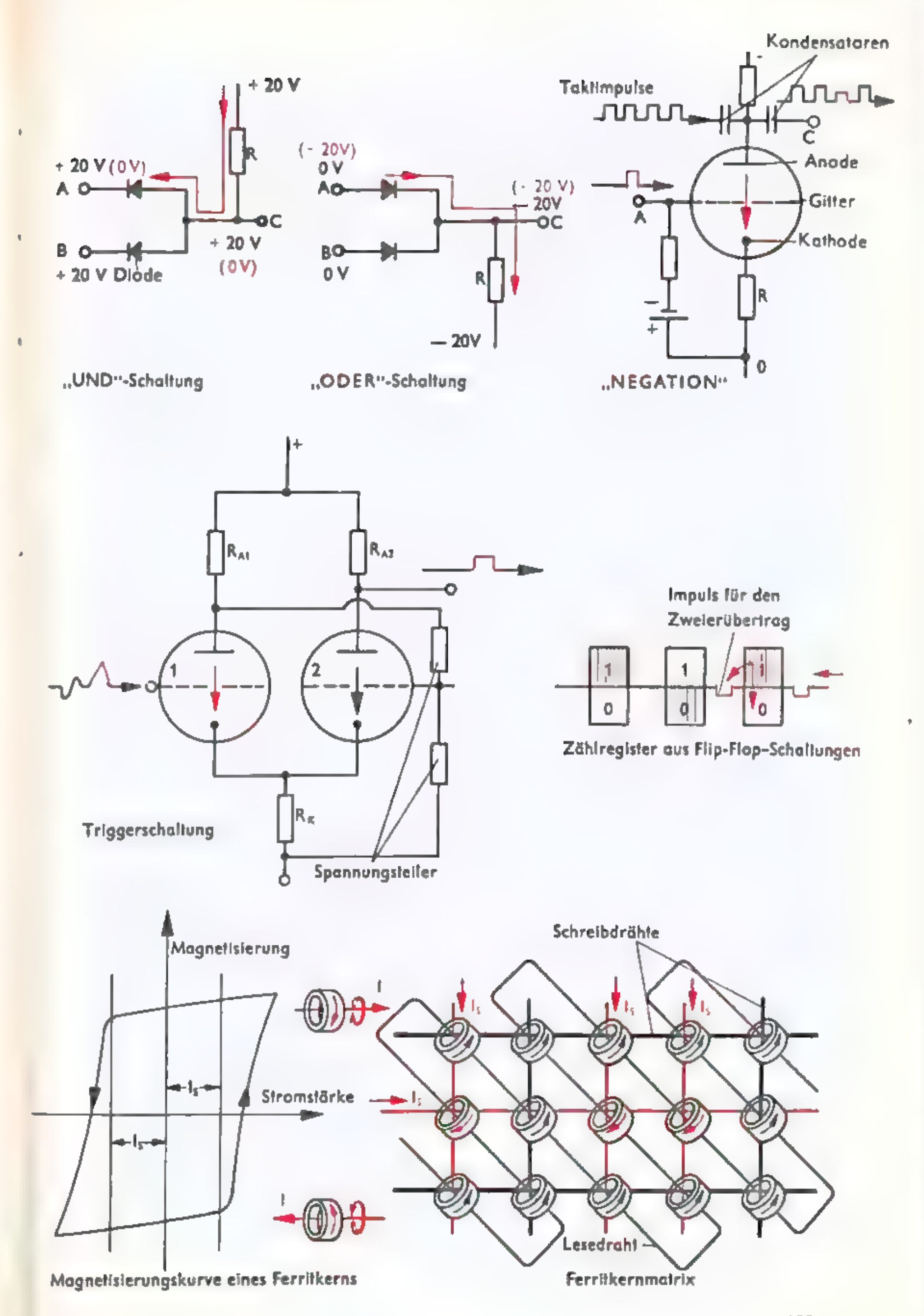
„UND" — A, B → C

„ODER" — A, B → C

„NEGATION" — A → C

GRUNDLAGEN DER INFORMATIONSVERARBEITUNG II

Schaltungen für die elementaren logischen Verknüpfungen sind die Elemente für den Aufbau von Rechenschaltungen. Die Abb. zeigt Schaltungen für den Fall, daß „JA“ durch einen positiven Spannungsimpuls, „NEIN“ durch einen negativen oder fehlenden Impuls dargestellt wird. In der „UND“-Schaltung fließt im Ruhezustand (schwarz) kein Strom, der Ausgang C liegt deshalb wie A und B auf +20 V. Wird wenigstens einer der Eingänge A und B auf 0 V gelegt, so fließt über die zugehörige Diode ein Strom, im Widerstand R tritt ein Spannungsabfall auf; da die Diode für diese Stromrichtung praktisch widerstandslos ist, erhält C die Spannung 0 V. In der „ODER“-Schaltung sperren beide Dioden, wenn A und B auf 0 V liegen. Erscheint an A oder B oder an beiden Eingängen +20 V, so ist auch C ohne Widerstand mit +20 V verbunden. In der Schaltung für „NEGATION“ ist das Gitter der Röhre relativ zur Kathode negativ eingestellt. Die Röhre sperrt und die Taktimpulse laufen ungestört über die beiden Kondensatoren an der Anode. Tritt an A ein positiver Impuls auf, so leitet die Röhre, der gerade durchlaufende Taktimpuls wird unterdrückt oder doch stark geschwächt. Die Ausgangsimpulse der Verknüpfungsschaltungen haben oft nicht die für eine weitere Verarbeitung notwendige Form. Zum Beispiel liefert die „ODER“-Schaltung für „NEIN“ −20 V statt 0 V, die Negationsschaltung unterdrückt die negierten Impulse nicht völlig. Sogenannte Trigger stellen aus positiven Impulsen beliebiger Form Rechteckimpulse einheitlicher Höhe her. In der gezeichneten Triggerschaltung leitet im Ruhezustand (schwarz) Röhre 2; Röhre 1 sperrt, da ihr Gitter relativ zur Kathode negativ ist; ihre hohe Anodenspannung gibt über einen Spannungsteiler dem Gitter der Röhre 2 positive Spannung. Erscheint nun am Eingang ein positiver Impuls, so beginnt beim Überschreiten einer bestimmten Gitterspannung Röhre 1 zu leiten. Ihre Anodenspannung sinkt dadurch, und über den Spannungsteiler wird auch die Gitterspannung von Röhre 2 so niedrig, daß jetzt diese Röhre sperrt. Zugleich steigt die Spannung am Ausgang. Der Übergang zwischen beiden Zuständen der Schaltung erfolgt so sprunghaft, daß positive Eingangsimpulse ausreichender Höhe unabhängig von ihrer Form scharfe Rechteckimpulse am Ausgang liefern. Gestaltet man die Schaltung symmetrisch, so entsteht die Flip-Flop-Schaltung. Ein an beide Gitter gegebener negativer Impuls beeinflußt die sperrende Röhre nicht. Er wirkt so, als sei er nur auf das andere Gitter gegeben, und bringt das System in den Zustand, in dem beide Röhren ihre Rollen vertauscht haben. Ordnet man die Ziffern 0 und 1 des Dualsystems den beiden Zuständen zu, so lassen sich Zähler aufbauen. Der beim Übergang von 1 nach 0 auftretende Ausgangsimpuls wird als Zweierübertragung an die Flip-Flop-Schaltung für die nächsthöhere Dualstelle gegeben.
Eine weitere Möglichkeit zur Speicherung von 1 bit Information bieten ringförmige Magnetkerne aus Ferriteisen. Sie ändern erst beim Überschreiten einer bestimmten äußeren Feldstärke ihre Magnetisierungsrichtung und gehen dabei sofort in die magnetische Sättigung über. Sie dienen zum Aufbau von Speichern, in denen jede Zelle praktisch ohne Zugriffszeit gelesen und beschrieben werden kann. In der abgebildeten Ferritkernmatrix ändern nur diejenigen Kerne ihre Magnetisierungsrichtung, durch die zwei stromführende Drähte führen. Dadurch kann jeder Kern einzeln beeinflußt werden. Beim Lesen wird nacheinander in alle Kerne der betreffenden Zelle „NEIN“ eingeschrieben. Die Kerne in „JA“-Stellung induzieren durch ihre Magnetisierungsänderung im Lesedraht einen Strom. Ihr alter Zustand muß anschließend wiederhergestellt werden.



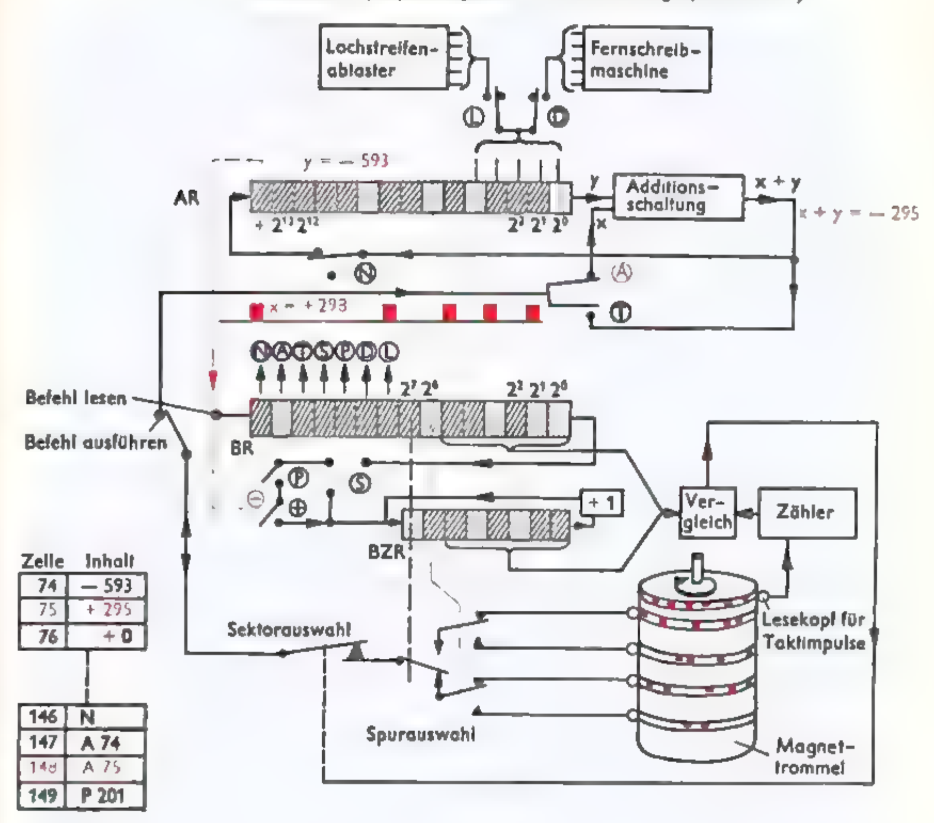
PROGRAMMGESTEUERTE ELEKTRONISCHE RECHENANLAGE

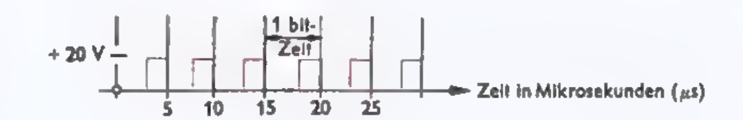
Elektronische Rechenanlagen sind universelle Anlagen zur Informationsverarbeitung, große Zahlenrechnungen sind nur eine besonders häufige Anwendung. Der Name Rechenanlage ist üblich, weil jede Information durch Zahlen verschlüsselt werden kann und ihre Verarbeitung damit zum Zahlenrechnen wird. Wesentliche Eigenschaften eines modernen Elektronenrechners sind 1. schneller Ablauf aller Rechenoperationen durch Verwendung trägheitsloser elektronischer Bauelemente, 2. Steuerung durch ein in den Speicher der Anlage eingeschriebenes Programm. — Die Schemazeichnung zeigt die wichtigsten Teile eines Rechners, in dem die einzelnen bit (s. S. 680) eines Wortes als Spannungsimpulse nacheinander verarbeitet werden (Serienmaschine). Als Register dienen Ketten von Verzögerungsgliedern, in denen ein Impuls um den Zeitabstand zweier Impulse verzögert wird. Vom Ende der Kette läuft die Impulsfolge wieder zurück in den Eingang. Wenn der letzte Impuls eines Wortes gerade eingelaufen ist, kann jedes bit am entsprechenden Glied der Kette abgefragt werden. Im Arbeitsregister (AR) ist eine Additionsschaltung in den Kreislauf eingefügt. Sie wird vom Inhalt des AR und der von der Magnettrommel kommenden Impulsfolge synchron durchlaufen und addiert beide, bit für bit, beginnend mit der niedrigsten Dualstelle. Das Befehlszählregister (BZR) nimmt nur 8 Dualstellen auf, sein Inhalt wird bei jedem Umlauf um 1 erhöht. Der Rechner arbeitet in zwei Zyklen: Im ersten bestimmt das BZR, welches Wort von der Magnettrommel ins Befehlsregister (BR) gelangt. Einige Dualstellen dieses Befehlswortes, der Operationsteil, wirken auf elektronische Schalter in den Impulsleitungen und legen so die im nächsten Zyklus auszuführende Operation fest. In diesem zweiten Zyklus bestimmen die 8 untersten Stellen des BR, der sogenannte Adreßteil des Befehls, die Auswahl der Speicherzelle. In der Abb. steht im BZR 148. Dadurch wurde im vorhergehenden Zyklus der Inhalt von Zelle 148 ins BR gebracht. Dieser Befehl enthält an der Stelle für A einen Impuls und schließt den Schalter A. Der Adreßteil ist 75. In dem Augenblick, in dem Zelle 75 den Lese- und Schreibkopf der Trommel erreicht, schließt der Schalter „Sektorauswahl" für die Dauer eines Wortes und die gespeicherte Impulsfolge durchläuft zusammen mit dem bisherigen Inhalt des AR die Additionsschaltung. Inzwischen hat sich der BZR-Stand auf 149 erhöht, im nächsten Zyklus wird der in Zelle 149 stehende Befehl „P 201" ins BR geholt. In der Schemazeichnung sind noch folgende Befehle vorgesehen:

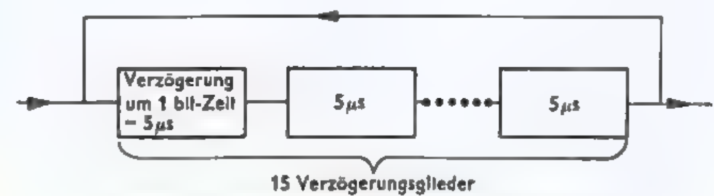
N: Löschen des AR. Der Kreislauf im AR wird für die Dauer eines Wortes unterbrochen.
T n: Die im AR umlaufende Impulsfolge wird in Zelle n eingeschrieben.
S n: Sprung des Programmablaufs nach Zelle n. Der Adreßteil gelangt über den Schalter S ins BZR.
P n: Sprung nach Zelle n, wenn AR-Inhalt positiv.
D: Drucken eines Fernschreibzeichens entsprechend den niedrigsten 5 Stellen des AR.
L: Die im Lochstreifenabtaster liegende Lochkombination liefert die 5 niedrigsten Stellen des AR.

Eine praktisch brauchbare Maschine benötigt zusätzlich Befehle zur Verschiebung eines Registerinhalts nach rechts oder links, für die Vorzeichenumkehr usw. Eigene Befehle für Multiplikation und Division lassen sich notfalls durch Programme, in denen nur Additionen auftreten, ersetzen. Bequemer in der Benutzung sind Anlagen, in denen auf vier parallelen Impulsleitungen die Dezimalziffern 6 bis 9 dargestellt und verarbeitet werden (Serien-Parallelmaschinen).

Aufbau einer programmgesteuerten Rechenanlage (schematisch)







Register zur Speicherung einer Impulsfolge der Länge 15 bit

RECHENPROGRAMM

Für die Berechnung der Exponentialfunktion $y = e^x$ gilt die unendliche Reihenentwicklung

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{1 \cdot 2} + \frac{x^3}{1 \cdot 2 \cdot 3} + \cdots + \frac{x^k}{1 \cdot 2 \cdots k} + \cdots$$

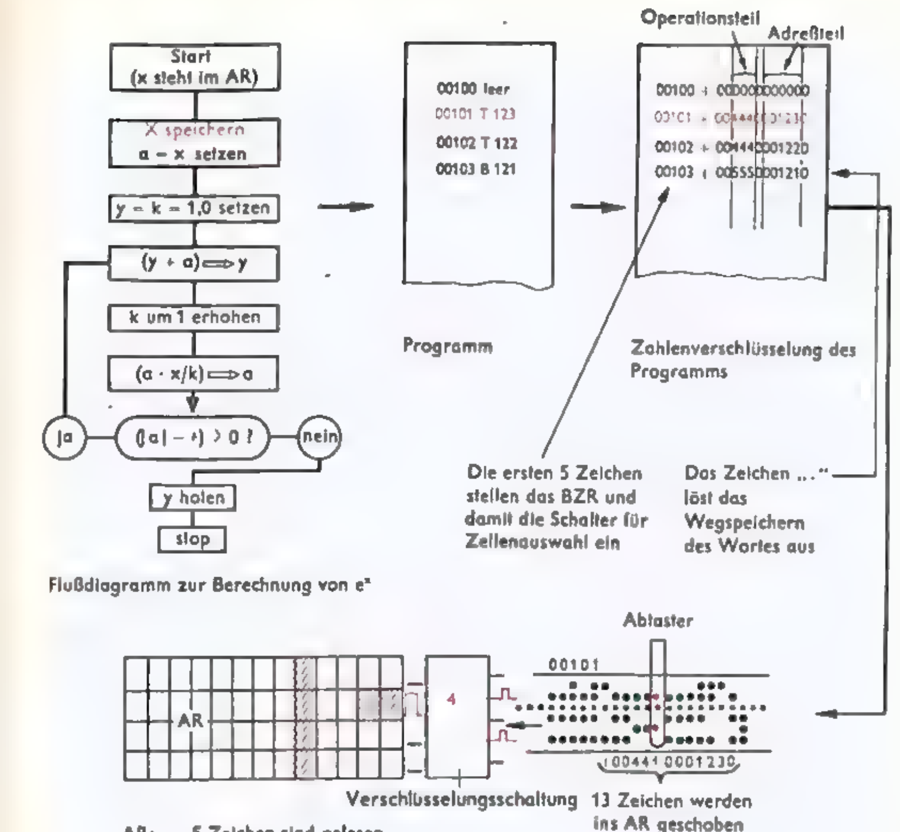
Da der Betrag der Reihenglieder immer kleiner wird, kann die Summation abgebrochen werden, wenn das zuletzt berechnete Glied kleiner ist als eine Zahl ε, die die Genauigkeit vorschreibt. Wir betrachten ein Programm für einen elektronischen Rechner mit dezimaler Zahlendarstellung auf vier parallelen Impulsleitungen. Ein Maschinenwort soll 12 Dezimalstellen und das Vorzeichen enthalten. Dezimalbrüche wie z. B. 0,00347 schreiben wir in der Form $0{,}347 \cdot 10^{-2}$ und benutzen für die ersten 10 Stellen nach dem Komma 10 Stellen des Maschinenwortes. Der Zehnerexponent (im Beispiel −2), vermehrt um 50, heißt Charakteristik und besetzt die letzten 2 Stellen. Die Maschine soll folgende Befehle ausführen können (vgl. S. 684):

- B n: Bringe Inhalt von Zelle n ins AR.
- T n: Trage Inhalt des AR nach Zelle n.
- + n: Addiere zum AR-Inhalt den Inhalt von Zelle n.
- × n: Multipliziere AR mit Zelle n.
- : n: Dividiere AR durch Zelle n.
- V : Setze Vorzeichen des AR positiv.
- P n: Bringe die Adresse n ins BZR, wenn AR positiv.
- R n: Bringe die in Zelle n stehende Adresse ins BZR.
- Z : Stop des Programms.

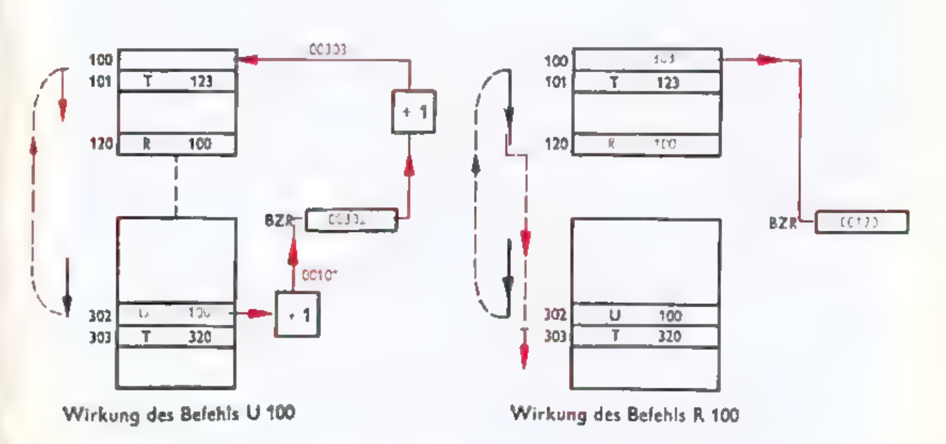
Das Flußdiagramm liefert folgendes Programm zur Berechnung von e^x:

Zelle	Inhalt	Zelle	Inhalt	Zelle	Inhalt
00100	leer	00110	+121	00120	Z (R 100)
1	T 123	1	T 125	1	1,0
2	T 122	2	B 122	2	a
3	B 121	3	×123	3	X
4	T 124	4	: 125	4	Y
5	T 125	5	T 122	5	K
6	B 124	6	V	6	0,00001 = ε
7	+122	7	−126	7	leer
8	T 124	8	P 106		
9	B 125	9	B 124		

Hier ist vorausgesetzt, daß zu Beginn das Argument x im AR steht. Beim Stop steht das Ergebnis im AR. Dieses Programm muß in der maschineneigenen Zahlenverschlüsselung (vgl. Abb.) auf einen Lochstreifen geschrieben werden. Die ersten 5 Ziffern legen beim Einlesen des Lochstreifens die Schalter für die Auswahl einer Speicherzelle fest, in die dann die weiteren 13 Zeichen gespeichert werden. Die Berechnung von e^x für einen einzelnen Wert von x kann dann folgendermaßen geschehen: Eingabe von x ins AR, Einstellung des BZR auf 00101, Start des Programmablaufs. Praktisch sinnvoll wird das Programm erst als Unterprogramm. Ein neuer Befehl U n soll, wenn er in Zelle x steht, die Adresse x + 1 nach Zelle n bringen und das BZR auf n + 1 einstellen. Durch den Befehl R n erfolgt dann der Rücksprung nach x + 1. Damit kann an jeder Stelle eines großen Programms durch U 100 die Berechnung von e^x wie ein eigener Befehl aufgerufen werden.



Flußdiagramm zur Berechnung von e^x



Wirkung des Befehls U 100

Wirkung des Befehls R 100

Unterprogrammsprung

ÜBERSETZUNGSPROGRAMM

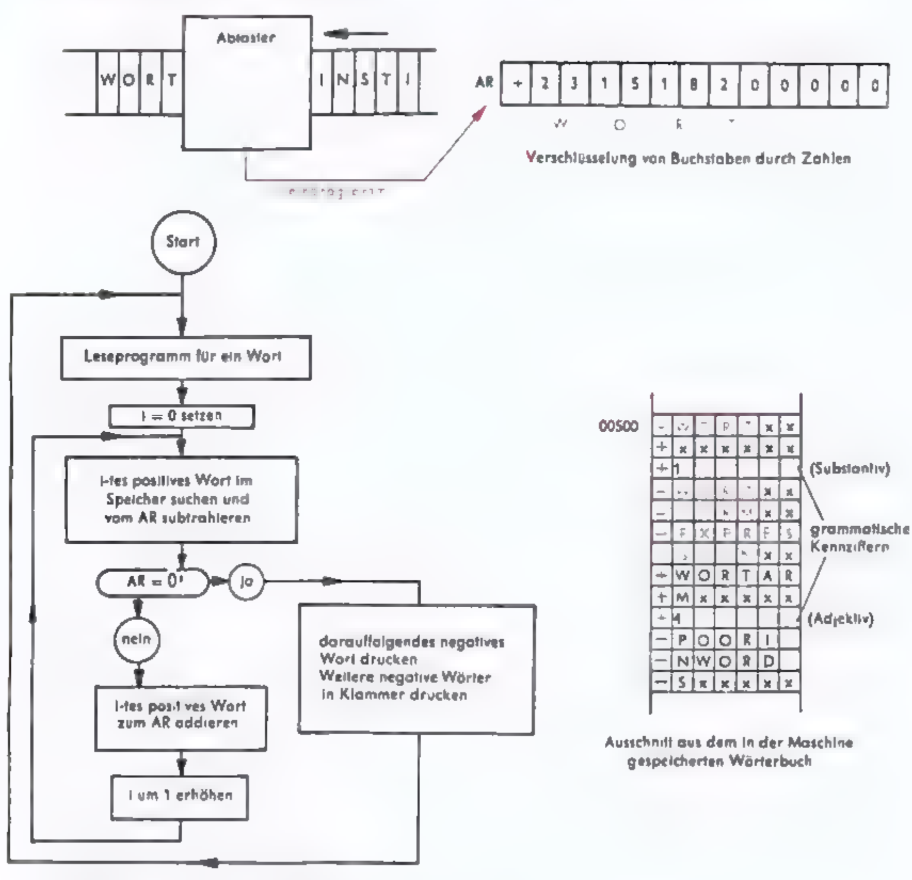
Zur maschinellen Übersetzung in eine andere Sprache muß ein Text zunächst als Folge von Maschinenworten verschlüsselt werden. Zum Beispiel kann man jedem der 32 Zeichen einer Fernschreibmaschine eine der Zahlen 01 bis 32 zuordnen. Ein Wort mit n Buchstaben belegt dann 2n Dezimalstellen im Speicher, unter Umständen mehrere aufeinanderfolgende Zellen.

Auf diese Weise kann ein „Wörterbuch" mit Eintragungen über die grammatikalischen Eigenschaften jedes Wortes gespeichert werden. Die Rohübersetzung eines Satzes erfordert den Vergleich der von einem Lochstreifen gelesenen Wörter mit den Eintragungen im „Wörterbuch". Enthält das „Wörterbuch" jedes Wort in jeder seiner Formen, so ist im Speicher einfach die Zahl zu suchen, die gleich der gelesenen Zahl ist. Aus Speicherplatzgründen ist es vorteilhafter, nur ein Verzeichnis der Wortstämme und ein weiteres für Endungen und Vorsilben zu speichern. Der Wortstamm wird dann als diejenige Zahl gesucht, die mit der gelesenen Zahl in möglichst vielen Stellen übereinstimmt.

Die von der Maschine gedruckte Rohübersetzung erspart nur das Nachschlagen in einem Wörterbuch und muß noch überarbeitet werden. Die Kennzeichnung der Wörterbucheintragungen durch Kennziffern für Substantive, Verben usw. macht es jedoch möglich, auch den syntaktischen Aufbau eines Satzes zu berücksichtigen. Zum Beispiel kann ein Schachtelsatz wie eine mathematische Formel durch Klammern gegliedert werden. Im Deutschen entspricht die Aufeinanderfolge von Substantiv und Reflexivpronomen einer öffnenden Klammer, das Verb in seiner Aktivform einer schließenden Klammer. Im Englischen müssen diese Klammern aufgelöst werden. Das kann dadurch geschehen, daß jedesmal, wenn nacheinander die Kennziffern für Substantiv und Reflexivpronomen auftreten, ein neuer Abschnitt für die Speicherung der Übersetzung begonnen wird. Beim Auftreten des Verbs wird das Programm wieder auf Speicherung in den vorher benutzten Speicherabschnitt umgestellt.

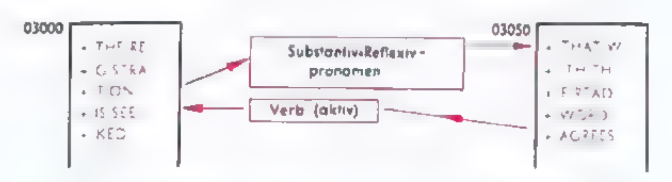
Übersetzungsprogramme benötigen sehr viel Speicherplatz für „Wörterbücher". Man verwendet deshalb Magnetbänder als Zubringerspeicher. Der Vorschub eines Magnetbandes bis zu der gesuchten Stelle erfordert mehrere Sekunden. Deshalb ist es günstig, den in einer bestimmten Phase des Übersetzungsprogramms benötigten „Wörterbuch"-Abschnitt auf den schnell abfragbaren Arbeitsspeicher (Magnettrommel oder Ferritkernspeicher) der Maschine zu übertragen und das Absuchen dort auszuführen.

Zu übersetzender Text:
DER EINTRAG, DER MIT DEM GELESENEN WORT ÜBEREINSTIMMT, WIRD GESUCHT



Flußdiagramm für die maschinelle Herstellung einer Rohübersetzung

Rohübersetzung des Textes ins Englische:
THE REGISTRATION, THAT WITH THE READ WORD (TERM, EXPRESS ON AGREES, IS SEEKED (SEARCHED)



Berücksichtigung des Satzbaus durch Wechsel der Speicherabschnitte beim Auftreten bestimmter grammatischer Kennziffern

FARBFERNSEHEN I

G r u n d p r i n z i p : 1. Umwandlung der Farbtöne („Farben") und der Farbsättigung („Farbstärke") in elektrische Signale (Ströme oder Spannungen); 2. elektrische Übertragung über Leitungen oder drahtlos an den Empfangsort; 3. Rückwandlung in ein farbiges Bild.

Zur Umwandlung werden mindestens drei Farbauszüge — wie z. B. beim Farbdruck in den Grundfarben Rot (R), Grün (G) und Blau (B) — mit drei Fernsehaufnahmekameras unter Verwendung von Farbfiltern hergestellt. Die einzelne Kamera gleicht der, die im Schwarzweißfernsehen benutzt wird (s. S. 334); die lichtempfindlichen Schichten der Kameraröhren sind den Filtern angepaßt. Die Abtastraster der drei Kameraröhren müssen Deckungsgleichheit (Konvergenz) besitzen, andernfalls entstehen Farbsäume; aus dem gleichen Grund wird nur ein Objektiv mit Zwischenabbildung verwendet. Die Stärke der elektrischen Farbsignale E_R, E_G, E_B ist ein Maß für die Farbsättigung der drei Farbauszüge.

Mittels eines elektrischen Übertragungssystems werden die Farbsignale E_R, E_G und E_B gleichzeitig (simultan) drei Bildröhren zugeführt und wieder in die Farbauszüge R, G, B zurückverwandelt, wobei die drei Schirmbilder über farbtrennende (dichroitische) Spiegel im Auge des Beobachters als farbiges Gesamtbild in additiver Farbmischung vereint erscheinen. Große Probleme bringen die Übertragung und die Rückwandlung (Empfang). Heute hat sich in den USA, in Westeuropa und in der UdSSR der Kompromißvorschlag des National Television System Committee (NTSC-System) der USA durchgesetzt.

Beim NTSC-System wird aus den E_R-E_G-E_B-Signalen nach einem Schlüssel (Code) entsprechend der Augenempfindlichkeitskurve in einem „Coder" ein Helligkeitssignal (Luminanzsignal) E_Y gebildet, das mit voller Bandbreite von 5 MHz übertragen wird und am normalen Fernsehempfänger als Schwarzweißbild einer farbigen Vorlage erscheint. Dieses Frequenzband ist jedoch nicht durchgehend vom Fernsehsignal besetzt, sondern zeigt gleichmäßig verteilte Lücken im Abstand der Zeilenfrequenz, in die die Farbinformation (Chrominanzsignal) eingeschaltet wird. Hierzu dient ein Farbhilfsträger, dessen Frequenz ein ungeradzahliges Vielfaches der halben Zeilenfrequenz ist. Dadurch wird die feine Perlschnurstörung durch den Farbhilfsträger im Schwarzweißbild infolge der Trägheit des Auges nahezu ausgelöscht, weil in zwei aufeinander folgenden Zeilen eines Halbbildes die Stellen größter und kleinster Helligkeit der Perlschnur gerade unmittelbar übereinander liegen. Das NTSC-System ist somit für Schwarzweißempfänger voll verträglich (kompatibel). Zur Farbinformation genügt es, im Coder zwei Farbdifferenzsignale (z. B. E_R-E_Y und E_B-E_Y) zu bilden und diese über den in Amplitude (Farbsättigung) und Phase (Farbton) doppelt modulierten Farbhilfsträger zu übertragen. Das fehlende grüne Differenzsignal E_G-E_Y läßt sich am Empfangsort aus den beiden anderen wiedergewinnen.

In der Praxis des NTSC-Systems werden statt E_R-E_Y und E_B-E_Y zwei neue Kombinationen E_I und E_Q wegen ihrer besseren Übertragungseigenschaften benutzt. Dabei genügt für E_I eine Bandbreite von 1,5 MHz und für E_Q von 0,6 MHz, weil das Auge Farbübergänge Orange→ Blaugrün (E_I) etwas schlechter und solche von Grün→ Purpur (E_Q) wesentlich schlechter als Helligkeitsübergänge auflösen kann. E_Y, E_I und E_Q modulieren die Bildträgerfrequenz eines Fernsehsenders.

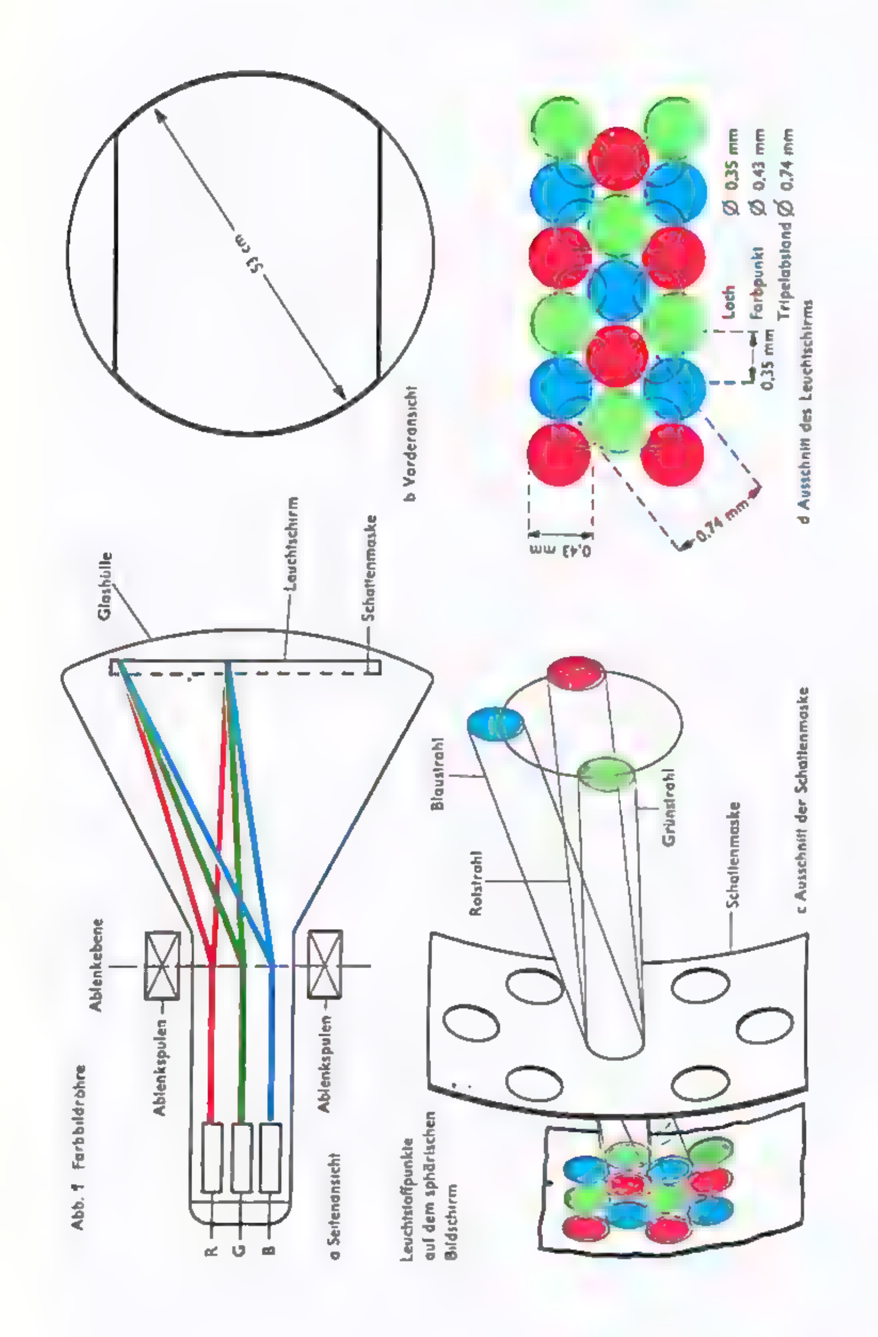


Abb. 1 Farbbildröhre

FARBFERNSEHEN II

Am Empfangsort entsteht das Helligkeitssignal E_Y unmittelbar nach der ersten Demodulation, während E_I und E_Q in einer zweiten Demodulation mittels des im Empfänger phasenrichtig zugesetzten Farbhilfsträgers gewonnen werden. Ein „Entschlüßler" (Decoder) bildet aus E_I und E_Q die Farbdifferenzsignale E_R-E_Y, E_G-E_Y und E_B-E_Y, von denen jeweils das Helligkeitssignal E_Y abgezogen wird, so daß die ursprünglichen drei Farbauszugsignale E_R, E_G und E_B wieder zur Verfügung stehen.
Die Farbbildröhre nach Abb. 1 (S. II) enthält drei Elektronenstrahlerzeuger, die so ausgerichtet sind, daß ihre Strahlen gemeinsam durch eines der 357 000 Löcher (0,35 mm Ø) einer Lochblende (Schattenmaske; engl. shadow-mask) auf eine Dreiergruppe (Tripel) von rot, grün und blau aufleuchtenden Phosphorscheibchen (0,43 mm Ø) fallen, die insgesamt den Farbbildschirm darstellen. Er enthält in regelmäßiger Anordnung 3 × 357 000 = 1 071 000 Farbleuchtpunkte. Der Abstand zwischen Schirm und Maske beträgt 11,5 mm, der der Farbtripel untereinander 0,74 mm. Die Herstellungsschwierigkeiten der Schattenmasken-Farbbildröhre erschienen anfangs fast unüberwindlich; auch heute noch zählt die Herstellung dieser Röhren zu den Spitzenleistungen der Hochvakuumtechnik. Die für die drei Elektronenstrahlen gemeinsame magnetische Ablenkung muß so ausgeführt werden, daß sie auch am Bildrand gemeinsam durch das richtige Loch auf die richtigen Farbphosphorscheibchen fallen, weil sonst Farbsäume entstehen. Das Helligkeitssignal E_Y wird den drei Kathoden der Strahlerzeuger gemeinsam, die drei Farbdifferenzsignale werden den zugehörigen Steuergittern (Wehnelt-Zylinder) getrennt zugeführt. Die Stärke der Elektronenstrahlen und damit die Leuchtkraft der Phosphorscheibchen hängt nur noch von E_R, E_G und E_B ab, so daß die drei Farbauszüge R, G, B gleichzeitig auf dem Farbbildschirm erscheinen.
Farbmetrik und Quadraturmodulation QAM: Jede Farbe ist durch Mischung der drei Primärfarben Rot (R), Grün (G) und Blau (B) gemäß dem Farbdreieck der Internationalen Beleuchtungskommission (IBK) darstellbar (Abb. 2). Es enthält den Weißpunkt W für „unbunte" Farben. Die Umformung des „Spektralfarbenzuges" von B über G nach R zusammen mit der „Purpurlinie" R nach B zu einem „Farbkreis" (Abb. 3) erlaubt beim NTSC- und PAL-System (s. u.) die Zuordnung von Farbton- und Farbsättigung sowie der Farbdifferenzsignale U und V und des Farbsynchronsignals (burst) zur Phase und Amplitude des Zeigers der Farbhilfsträgerschwingung.
Das NTSC-System: Den Vorzügen des 1953 eingeführten NTSC-Systems, seiner sehr guten Verträglichkeit gegenüber Schwarzweißempfängern sowie der Tatsache, daß bei farblosen (unbunten) Szenen keine Übertragung des Farbhilfsträgers erfolgt, stehen schwerwiegende Nachteile gegenüber (Abb. 4): Verfälschung des richtigen Farbtones (der „Farbe") infolge aussteuerungsabhängiger (differentieller) Phasendrehung oder Verstärkung, d. h. nichtlinearer Verzerrungen im Übertragungssystem sowie besondere Empfindlichkeit gegen Ausbreitungsstörungen (Reflexion, Geisterbilder, Mehrwegeempfang) und Restseitenbandfehler (einseitige Frequenzbandbeschneidung). Daher ist ein Farbstellknopf unbedingt erforderlich, aber gleichzeitig können Unsicherheit und Willkür in der Farbtoneinstellung beim Farbfernsehteilnehmer auftreten. Außerdem müssen die Magnetbandmaschinen (z. B. Ampexmaschinen o. ä.) mit hochempfindlichen Regelautomatiken für die Phasenstabilität des Farbhilfsträgers versehen werden (wobei man bedenken muß, daß einem Winkel von ± 2,5° nur ± 2 Nanosekunden entsprechen!).

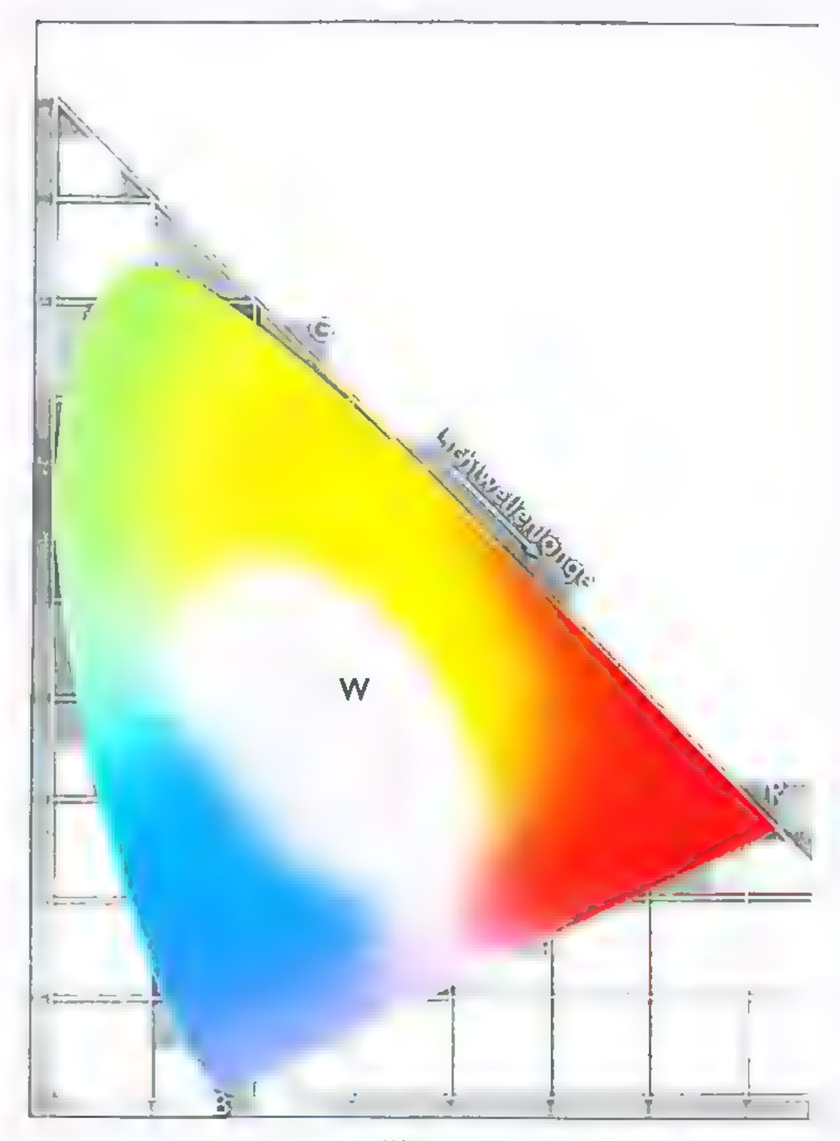


Abb. 2

FARBFERNSEHEN III

Das PAL-Farbfernsehsystem: 1961 beseitigte W. Bruch (Fa. Telefunken) durch eine Änderung des NTSC-Verfahrens praktisch sämtliche Systemfehler, indem er von einem der beiden Farbdifferenzsignale U oder V (Abb. 4) z. B. das V-Signal von Zeile zu Zeile automatisch umpolte, d. h. um 180° in der Phase drehte (engl. *P*hase *A*lternating from *L*ine to Line ergab die Bezeichnung PAL). Die automatische Umpolung wird dem Empfänger über das Farbsynchronsignal (burst) am Beginn jeder Zeile mitgeteilt. Zu V_+ gehört eine Burstphase von 135°, zu V_- 225°. Das nicht umgepolte Farbdifferenzsignal hat die Phase 0°. Die beiden Signale U und V werden mit gleicher Bandbreite von 1,5 MHz (— 3 dB) übertragen. Die fehlerhaften Farb-(Chrominanz-)Signale zweier aufeinanderfolgender Zeilen werden im Auge physiologisch (Simpel Pal) oder mit einer Verzögerungsleitung von Zeilendauer (65 μs) elektronisch addiert, so daß sich ihre Fehler, die durch die Phasenumpolung entgegengesetzte Vorzeichen erhalten haben, auslöschen. Es tritt dabei eine Entsättigung (Verblassen), aber keine Farbtonänderung mit dem Cosinus des Fehlwinkels ein; die z. B. bei einem 30°-Fehler auftretende Entsättigung von 13 % bleibt praktisch unbemerkt. Bei richtiger Codierung des Farbfernsehsignals im Studio ist trotz etwaiger Übertragungsfehler keine Korrektur am Empfänger nötig, der Farbstellknopf ist überflüssig. Beim NTSC-System liegen nach je 2 Halbbildern (= 1 Vollbild) dieselben Abtastverhältnisse vor, bei PAL dagegen erst nach je 4 Halbbildern, so daß die Frequenz f_F des Farbhilfsträgers gegenüber einem ganzzahligen Vielfachen der Zeilenfrequenz f_H von 15 625 Hz um $^1/_4 f_H$ versetzt werden muß (bei NTSC um $^1/_2 f_H$). Es ist

$$f_F = (284 - {}^1/_4) \cdot f_H + 25\ \text{Hz} = 4{,}43361875\ \text{MHz}.$$

Der 25-Hz-Versatz verbessert die Verträglichkeit für Schwarzweißempfänger.

Das System SECAM: Die Fehler des NTSC-Systems veranlaßten H. de France 1957, von der Doppelmodulation (in Amplitude und Phase) des Farbhilfsträgers abzugehen und die neben dem Helligkeitssignal E_Y erforderlichen zwei Farbdifferenzsignale ($E_R - E_Y$) und ($E_B - E_Y$) nicht mehr gleichzeitig (simultan), sondern nacheinander (sequentiell) zu übertragen. Da jedoch für die drei Steuersignale E_R, E_G, E_B der Farbbildröhre neben E_Y unbedingt die beiden Differenzsignale gleichzeitig gebraucht werden, muß das zuerst übertragene Differenzsignal, z. B. $E_B - E_Y$, während der Übertragungszeit des zweiten gespeichert werden. Es wird von Zeile zu Zeile umgeschaltet. Der erforderliche 64-μs-Speicher besteht aus einem Glasstab von etwa 20 cm Länge, der über einen Wandler zu Ultraschallschwingungen angeregt wird, die am Stabende etwa 64 μs später ankommen (frz. *Sé*quentiel *à mé*moire [aufeinanderfolgend mit Speicherung] ergab die Bezeichnung SECAM). Der Farbhilfsträger wird frequenzmoduliert, daher haben nichtlineare Phasen- und Amplitudenverzerrungen praktisch keinen Einfluß. SECAM ist empfindlich gegen Störungen bei kleinen Empfangsfeldstärken (schwachen Sendern) und Reflexionen. Das Farbauflösungsvermögen in Bildrichtung ist halbiert, vertikale Farbsprünge erzeugen Flimmern. Da bei unbunten Szenen der Farbhilfsträger nicht unterdrückt wird, ist die Kompatibilität schlechter. Die Restseitenbandfehler werden im Gegensatz zu PAL nicht kompensiert. SECAM ist prinzipiell jedoch sehr gut für Magnetbandaufzeichnung von Farbbildern geeignet, weil es auf die Phasenschwankungen des Farbhilfsträgers (infolge ungleichförmigen Maschinenlaufs) nicht anspricht. Im Chrominanzkanal werden abwechselnd nur reine Amplitudenwerte übertragen ohne Beziehung zur Farbhilfsträgerphase.

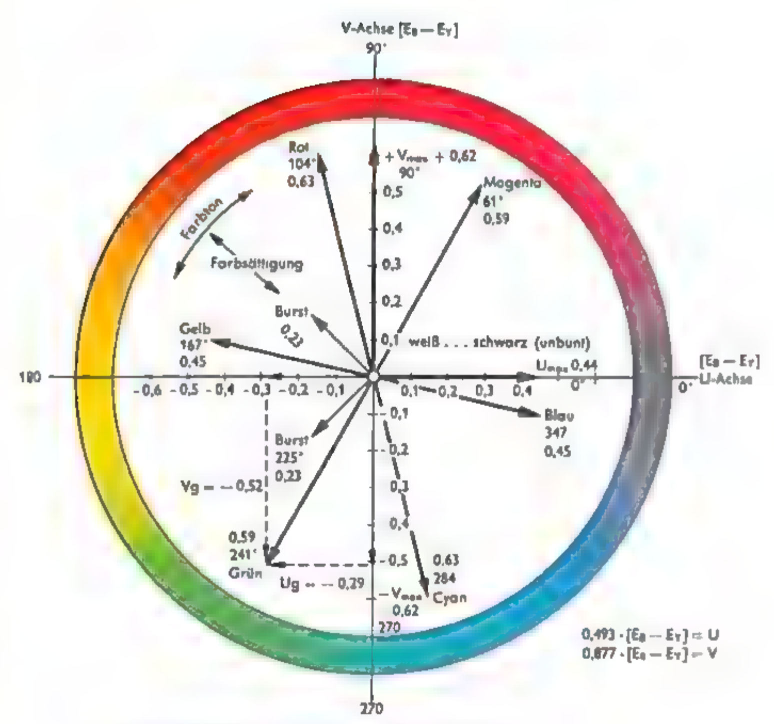


Abb. 3 Farbkreis für PAL. Für NTSC sind die U/V-Achsen durch die Q/I-Achsen unter Drehung um + 33° zu ersetzen; statt des alternierenden Burst nur ein Burst in 180°-Lage; Bezugsphase in beiden Systemen ist die des Burstes

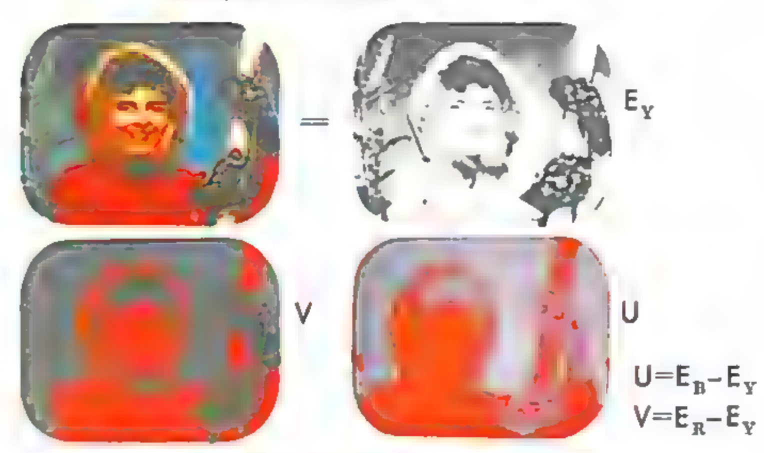


Abb. 4 Eigentliche Chrominanzsignale bei PAL

FARBPHOTOGRAPHIE I

Umkehrverfahren und Negativ-Positiv-Verfahren

Es gibt zahlreiche sehr unterschiedliche Verfahren, photographische Aufnahmen in natürlichen Farben wiederzugeben; im Prinzip gleichen sich jedoch alle Verfahren: Man muß drei Grundfarbenbilder herstellen, die erst in ihrem Zusammenwirken ein farbiges Bild erzeugen.

Die Siebverfahren beruhen auf dem Prinzip der *chromogenen Entwicklung* (R. Fischer, 1909): Den drei übereinanderliegenden Schichten (je für einen Spektralbereich sensibilisierte Schwarzweißemulsionen, zu denen noch eine dünne Gelbfilterschicht zwischen der obersten, blauempfindlichen, unsensibilisierten, und den übrigen lichtempfindlichen Schichten kommt) sind spezifische Farbbildner (Farbkuppler, Farbkomponenten) beigegeben, z. B. Phenole und Naphthole für die Farben Blau bis Blaugrün und Verbindungen mit reaktionsfähigen Methylengruppen für die Farben Gelb bis Purpur, die die Eigenschaft haben, mit den Oxydationsprodukten bestimmter Schwarzweißentwickler (p-Phenylendiamin-Derivate) parallel zum Schwarzweißprozeß die entsprechenden Farbstoffe zu bilden. Mit dem Schwarzweißbild entsteht somit ein Farbbild, das übrigbleibt, wenn die Silberschwärzung durch Ausbleichen entfernt wird. Da das Licht die drei Schichten nacheinander durchläuft, ergibt sich der Farbeindruck durch subtraktive Farbmischung. Dabei ist analog zum Schwarzweißbild ein Negativ-Positiv-Prozeß oder Umkehrentwicklung erforderlich, d. h., die blauempfindliche Emulsion enthält eine Gelbkomponente, die mittlere grünempfindliche Schicht eine Purpurkomponente, die unterste rotempfindliche eine Blaugrünkomponente, die zusammen nach der Entwicklung und dem Ausbleichen des Silberbildes ein komplementärfarbiges Negativ bilden. Von ihm kann man durch Kopieren oder Vergrößern auf ebenfalls dreischichtiges Farbmaterial Positive (Papierbilder) und Diapositive herstellen, auch Schwarzweißkopien sind möglich. Beim Umkehrverfahren ist das komplementärfarbige Negativ nur eine theoretische Zwischenstufe, da hier die Erstentwicklung als reiner Schwarzweißprozeß erfolgt. Erst das durch die Nachbelichtung erzeugte Positiv wird chromogen entwickelt. Das Silberbild wird anschließend wiederum ausgebleicht, so daß das reine Farbbild übrigbleibt.

Neben der Wahl geeigneter Sensibilisatoren und der Abstimmung der Farbsättigung der Komponenten aufeinander sowie auf die Farbtemperatur der Aufnahmebeleuchtung stellt die Diffusionsneigung der Farbbildner während der Entwicklung ein besonderes technisches Problem dar, das bei den einzelnen Fabrikaten auf verschiedene Weise gelöst worden ist: bei der *„Agfacolor®-Gruppe"* (u. a. Anscochrome®, Ferraniacolor®, Orwocolor® sind die als Salze wasserlöslichen Farbkuppler durch langkettige Reste (sogenannte Fettschwänze) diffusionsfest gemacht. Es handelt sich bei diesen langkettigen Resten um Kohlenwasserstoffgruppen, die den Farbbildnern z. B folgende Strukturformeln geben:

$C_{17}H_{35}$ · CO—NH—⬡—CO · CH_2—CO · NH—⬡(COOH)(COOH)

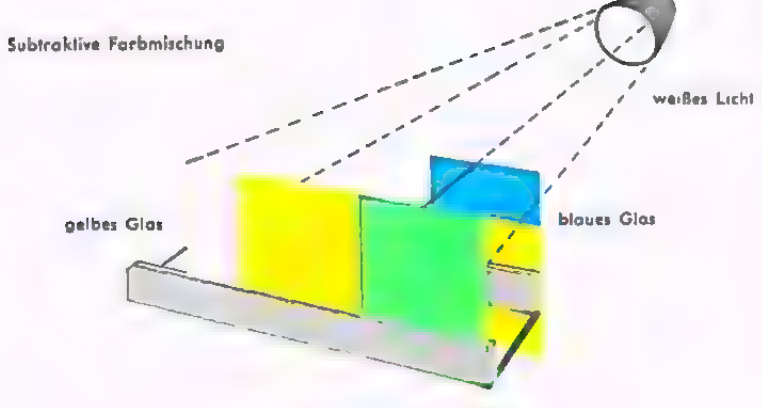
(Gelbkomponente)

⬡—O—⬡(SO_3H)—N<(N=C—$C_{17}H_{35}$)(C(=O)—CH_2)

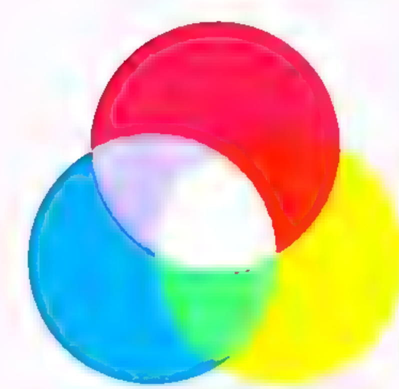
(Purpurkomponente)

HO—⬡⬡—SO_2H, CO—NH—$C_{18}H_{37}$

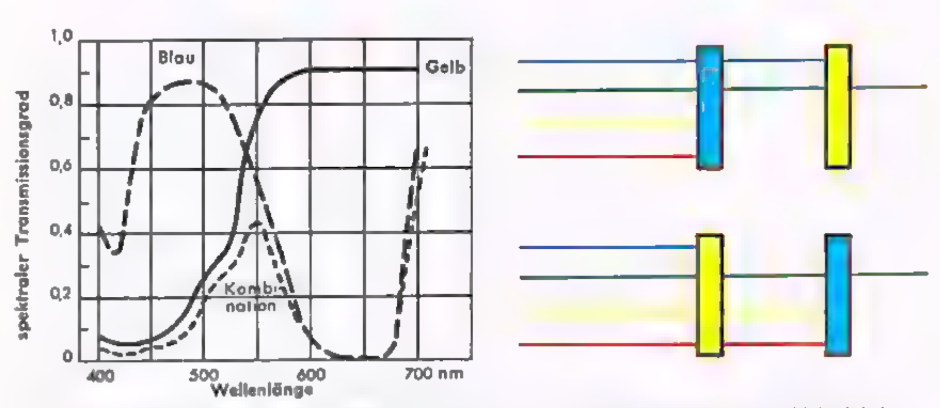
(Blaugrünkomponente)



mit 2 Farben: Gelb und Blau



mit 3 Farben: Gelb, Blau und Purpur



Wenn Strahlung nacheinander mehrere Filter durchsetzt, wird von jedem Filter jeweils in Abhängigkeit von der Wellenlänge ein Teil der Strahlung absorbiert.

FARBPHOTOGRAPHIE II

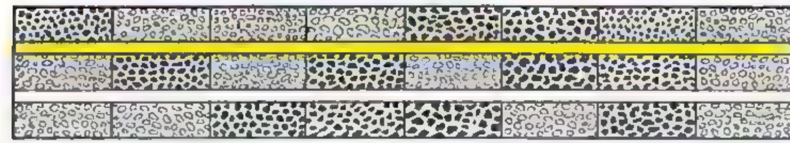
Die *„Ektachrome-Gruppe“* (Ektachrome ®, Ektacolor ®, Kodacolor ®, Perutz Color ®) besitzt sogenannte ölgeschützte Farbkuppler, die durch Auflösen in hochsiedenden anorganischen Lösungsmitteln und Dispergierung in kleine wasserunlösliche Tröpfchen eingelagert werden, so daß sie zwar mit den Oxydationsprodukten des Entwicklers reagieren können, die Tröpfchen aber ebenso wie der gebildete Farbstoff nicht verlassen. Außer der Diffusionsfestigkeit ergeben sich dabei noch weitere Vorteile: Die wechselseitige Beeinflussung von Schicht und Farbkuppler ist geringer, es können Chemikalien verwendet werden, die die Entwicklungszeit herabsetzen und dank ihrer geringeren Oxydationsneigung auch vom Amateur verarbeitet werden können (Umkehrfilme für die Selbstverarbeitung sind z. B. Ektachrome nach dem E-2- bzw. E-4-Verfahren, Ferrania CR 50). Nach dem Kodachrome-Verfahren ® arbeitende Materialien (*„Kodachrome-Gruppe“*, z. B. Ilford Color ®) enthalten keine Farbkuppler in den Schichten, diese befinden sich in den Entwicklerlösungen und gelangen während der unter selektiver Nachbelichtung mit verschiedenfarbigem Licht erfolgenden Entwicklung in die Schichten. Dabei wird zunächst die unterste Schicht mit rotem Licht diffus nachbelichtet und in einem Entwickler mit blaugrüner Farbkomponente entwickelt. Dann wird die oberste Schicht unter blauem Licht gelb entwickelt und schließlich die mittlere Schicht mit Purpurfarbbildnern entwickelt, und zwar unter Nachbelichtung mit weißem Licht oder ohne Nachbelichtung durch Entwickler mit schleierndem Zusatz. Anschließend werden Silberbild und Filterschicht entfernt. Das Verfahren ist nur bei Umkehrmaterialien möglich.

Eine Korrektur der Farbdichte in den einzelnen Schichten ist bei der Umkehrentwicklung nicht möglich. Beim Positivprozeß werden Farbstiche einheitlicher Dichte und Farbtemperaturdifferenzen zwischen Aufnahmebeleuchtung und Einstellung des Films sowie dem Kopierlicht durch Kopierfilter ausgesteuert. Problematisch sind Farbstiche uneinheitlicher Dichte. Es sind dies die unerwünschten Nebenfarbdichten der Blaugrün- (rötliche Nebendichte im blauen und grünen Spektralgebiet) und der Purpurkomponente (gelbe Nebendichte), die je nach der Farbsättigung von unterschiedlicher Stärke sind und durch einheitliche Kopierfilter nicht ausgesteuert werden können. Sie werden daher durch Masken von derselben Farbe zu einem Farbstich einheitlicher Dichte, der beim Kopieren ausgefiltert werden kann, kompensiert. Diese Masken sind auf dem Film befindliche Farbschichten, deren Farbstoffe bei der Belichtung ausbleichen und sich so entgegengesetzt zur unerwünschten Nebenfarbdichte abstufen. Einfach maskierter Negativfarbfilm liefert ein reineres Blau und Grün durch Ausgleich der Purpurnebendichte; doppelt maskierter Negativfilm gleicht sowohl die Nebenfarbdichten des Purpurs als auch die des Blaugrüns aus (durch eine Gelb- und eine Rotmaske).

Farbphotographisches Umkehrverfahren



a Objektfarben

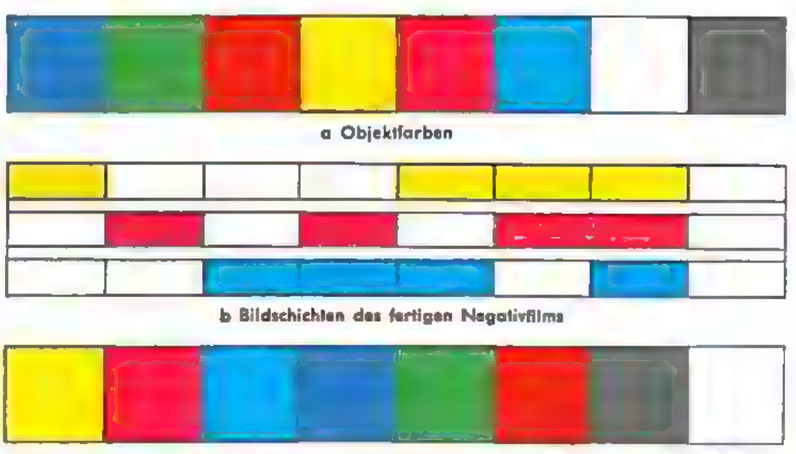


b Bildschichten des Films nach der ersten (Schwarzweiß-)Entwicklung: schwarze Körner = entwickeltes Silber, helle Körner = restliches Bromsilber; gelbe Filterschicht noch erhalten



c Dasselbe nach der fertigen Verarbeitung: Farben an dem restlichen Bromsilber entwickelt, Silber und Filtergelb herausgelöst; in der Durchsicht ergeben sich die Wiedergabefarben durch subtraktive Farbmischung, sie entsprechen den Objektfarben

Farbphotographisches Negativ-Positiv-Verfahren

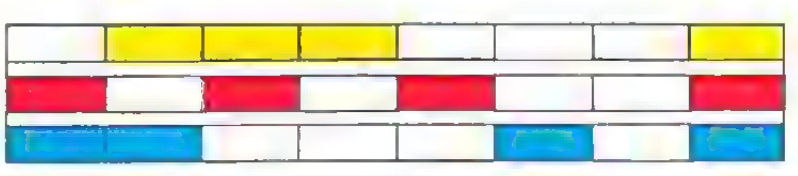


a Objektfarben

b Bildschichten des fertigen Negativfilms

c Fertiger Negativfilm in der Durchsicht: Farben komplementär zu den Objektfarben

d Farbneutralstellung der Kopie durch Kopierfilter



e Bildschichten des fertigen Positivs; in der Draufsicht ergeben sich die Wiedergabefarben durch subtraktive Farbmischung, sie entsprechen den Objektfarben

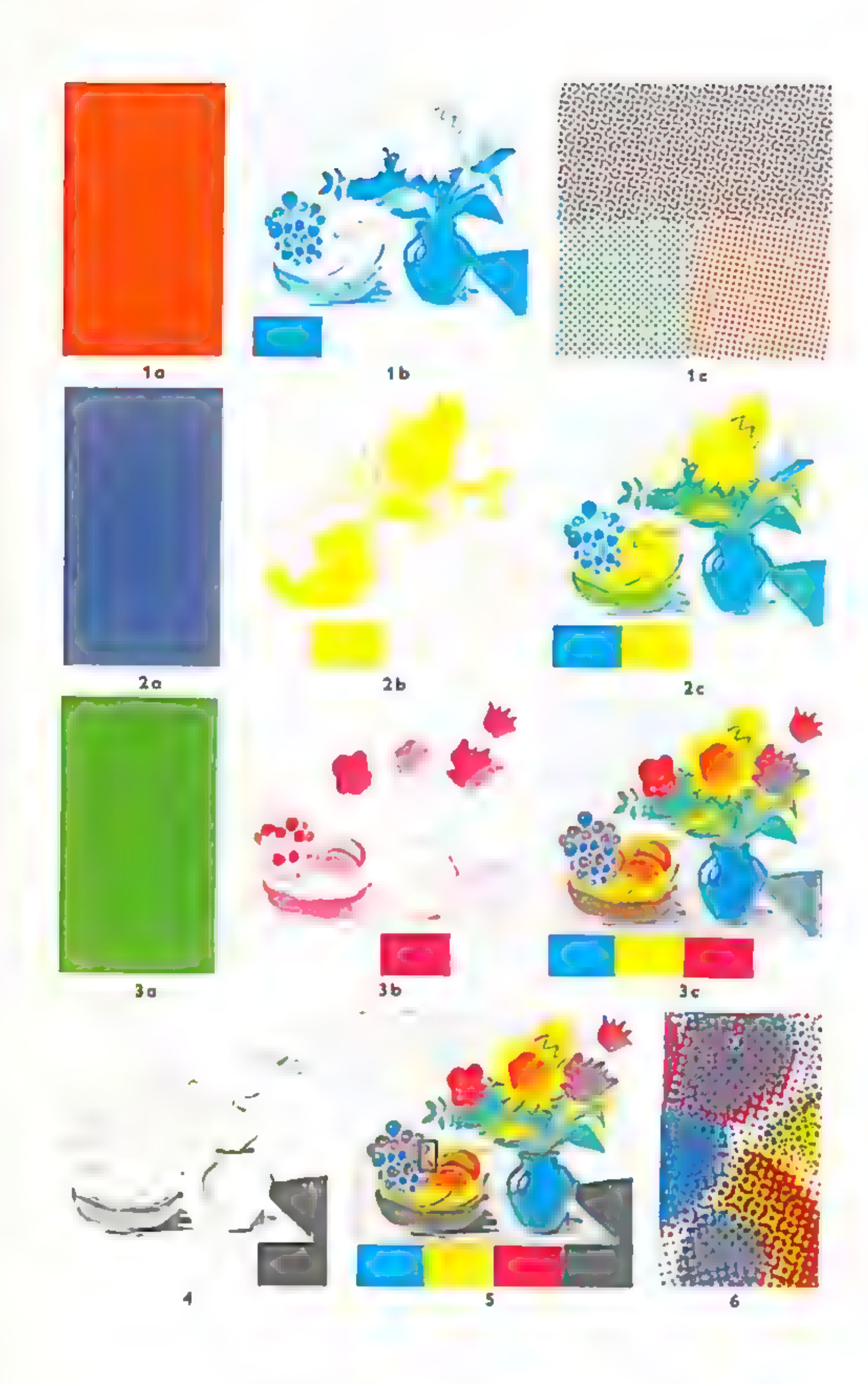
FARBDRUCK

Der Farbdruck hat in die Praxis viel früher Eingang gefunden als die Farbphotographie. In seiner einfachsten Form stellt er sich dar als Eindruck von farbigen Textzeilen, Flächen oder Figuren in das einfarbige Druckerzeugnis. Im engeren Sinn versteht man jedoch unter Farbdruck das mehrfarbige Gestalten eines Druckbogens oder die Reproduktion einer mehrfarbigen Vorlage mit drei oder mehr Farben.

Wenn man eine Fläche mit Punkten in den drei Grundfarben (Gelb, Rot, Blau) mosaikartig bedeckt (Abb. 1c) und diese Fläche aus genügender Entfernung betrachtet (die einzelnen Farbpunkte dürfen sich nicht mehr unterscheiden lassen), so entsteht der Eindruck, die Fläche sei grau. Wenn man auf einer Fläche zahlreiche Punkte zweier der Grundfarben nebeneinandersetzt, so entsteht beim Betrachten aus genügender Entfernung der Eindruck einer Mischfarbe (Abb. 1c). Dieses Zusammensehen ist eines der Grundprinzipien des Farbdruckes. Zunächst werden von der farbigen Vorlage, die man zu reproduzieren wünscht, auf photographischem Wege Farbauszüge hergestellt. Dazu werden Farbfilter in den Komplementärfarben des jeweils gewünschten Farbauszuges verwendet. Die Abb. 1a bis 1b, 2a bis 2b und 3a bis 3b zeigen nebeneinander die Farbe des Filters und die dadurch entstandenen Farbauszüge. Wir haben oben gesagt, daß die Fläche, die mit den Farbpunkten der einzelnen Grundfarben bedeckt ist, beim Betrachten grau erscheint. Dies liegt daran, daß die weiße Farbe des Papiers an vielen Stellen herauskommt. Aus diesem Grund wird zusätzlich zu den Farbauszügen eine Schwarzaufnahme hergestellt (Abb. 4), die erstens weiße Flächen wegnimmt und zweitens dem Gesamtbild Kraft und Konturen verleiht.

Nach den beschriebenen Teilauszügen werden für den eigentlichen Druck mit verschiedenen Methoden, die sich u. a. nach dem verwendeten Druckverfahren richten (z. B. Buchdruck, Tiefdruck, Offsetdruck), Druckplatten oder Druckzylinder geätzt. Sie nehmen im Druckprozeß die Druckfarbe auf und übertragen sie auf das Papier. Die Abb. 2c, 3c und 5 zeigen, wie durch das Übereinanderdrucken der vier verwendeten Druckplatten allmählich das farbige Wiedergabebild entsteht. Der in Abb. 6 (Vergrößerung des umränderten Teils aus Abb. 5) gezeigte Ausschnitt macht deutlich, daß beim Übereinanderdrucken der einzelnen Druckplatten nicht nur vier Farben zustande kommen, sondern daß die Überlagerung der einzelnen Rasterpunkte (vgl. S. 696) auch die Mischfarben aus den Grundfarben entstehen läßt. Abb. 6 entspricht also der mit Lupe betrachteten Abb. 5. Betrachtet man Abb. 5 ohne Lupe oder Abb. 6 aus genügender Entfernung, so sieht man, daß die einzelnen Farb- und Mischfarbpunkte (insgesamt 8 Farben!) zu homogenen Farbflächen zusammentreten.

Um einen regulären Farbdruck zu erhalten, müssen viele Gesichtspunkte beachtet werden. So müssen die verwendeten Farbstoffe rein und transparent sein, unter Umständen muß man für die Wiedergabe besonders anspruchsvoller Vorlagen Hilfsfarben einsetzen. Schließlich ist es wichtig, paßgenau zu drucken und Schwankungen der Farbnuancen und der Farbintensitäten beim Auflagendruck zu vermeiden. In der Praxis muß häufig noch von Hand auf den einzelnen Farbauszügen (die noch ohne Raster hergestellt werden) nachgearbeitet werden, damit die letzten gewünschten Feinheiten herauskommen.

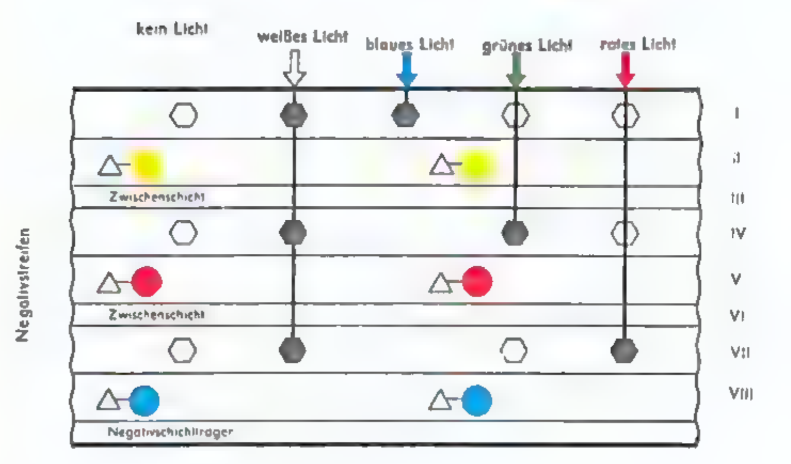


POLAROID-LAND-COLORFILM I

Von der beschriebenen, nun schon klassischen Farbphotographie unterscheidet sich das neue Diffusionsverfahren nach Dr. Land ganz grundsätzlich: Während normalerweise das Colornegativ entwickelt werden mußte, in ein Stopbad kam, gehärtet, gewässert, gebleicht, wieder gewässert, fixiert, gewässert, mit einem Netzmittel behandelt und schließlich getrocknet werden mußte, ehe überhaupt erst einmal das Farbnegativ fertig war, geschieht beim Landschen Colorfilmverfahren ein damit kaum mehr vergleichbarer und nur im physikalischen Grundprinzip annähernd ähnlicher Prozeß sozusagen ohne äußeres Zutun in hundertstel Millimeter dicken Schichten innerhalb von Sekunden. Ehe beim klassischen Colorfilmverfahren ein Farbpositiv als Bild fertig wurde, mußten zwanzig Verfahrensschritte auf die Sekunde genau und innerhalb eng einzuhaltender Temperaturgrenzen in Speziallaboratorien erledigt werden. Demgegenüber liefert das Farbfilmverfahren nach Dr. Land Farbphotographien binnen einer Minute. Dies geschieht auf folgende Weise: Ein sehr dünner, aus drei farblichtempfindlichen Schichten (I, IV, VII), drei weiteren, jeweils einer der drei farbempfindlichen Schichten benachbarten Schichten, die den zunächst farblosen Farbstoff der komplementären Farbe und den Schwarzweißentwickler in Form von Doppelmolekülen aneinander gebunden enthalten (II, V, VIII), zwei Zwischenschichten (III, VI) und dem Träger bestehender Negativstreifen wird photographisch belichtet. Dabei aktiviert blaues Licht die Silberhalogenkristalle in der blauempfindlichen Schicht I, grünes Licht läuft ungehindert auf die grünempfindlichen Silberhalogenkristalle der Schicht IV; strahlt das aufgenommene Objekt auch rotes Licht aus, so fällt dieses durch das Kameraobjektiv ungehindert durch die blauempfindliche und grünempfindliche Schicht auf die für Rotlicht sensibilisierten rotempfindlichen Silberhalogene der Schicht VII. Nun wird ein Streifen aus der Kamera gezogen. Dabei wird eine viskose Entwickleraktivierungspaste aus einer Kapsel gedrückt, indem Stahlwalzen die Negativschicht mit der inzwischen ausgequetschten Aktivierungspaste auf die sogenannte Positivschicht fest aufdrücken Die Positivschicht besteht aus der Farbempfängerschicht, einer Zwischenschicht, einer Säureschicht zur Neutralisation und Stabilisierung des Farbbildes und dem Träger. Die Aktivierungspaste diffundiert schnell in die Negativschicht, erreicht nacheinander zuerst die Farbstoff-Entwicklerschicht für Gelb, macht aus dem Mischmolekül Entwicklersubstanz für Gelb / latenter Farbstoff für Gelb den gelben Farbstoff und die Entwicklersubstanz in Schicht II frei, erreicht über die Zwischenschicht III und die grünempfindliche Schicht IV die Schicht V, diffundiert über die Zwischenschicht VI und die rotempfindliche Halogenschicht VII in die letzte Schicht VIII, wobei in den Schichten V und VIII ebenfalls die Farbstoff-Entwicklermoleküle freigesetzt werden. Alle freigemachten Farbstoff-Entwickler-Moleküle diffundieren nun frei in alle Richtungen. Sie erreichen zuerst die nächstliegenden, in Silberkorn umgewandelten belichteten ehemaligen Halogenkörner. Diese werden vom Entwickleranteil der Moleküle entwickelt, wobei die Farbstoffanteile festgehalten werden (Färbung des Negativs). Trifft das diffundierende Farbstoff-Entwickler-Molekül der Schicht VIII kein Silberkorn, dann wandert es ungehemmt durch alle Schichten bis zur Positivschicht. Dort wird es aufgefangen und festgehalten. Wie entsteht nun das farbige Bild?

Abb. 1 Filmnegativ wird belichtet: farbiges Licht fällt auf das achtschichtige Negativ





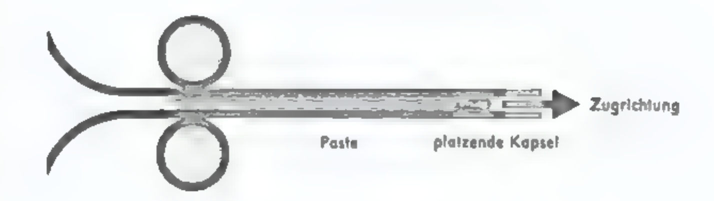




Abb. 2 Der dreischichtige Positivstreifen und der Negativstreifen werden aneinandergepreßt, die Entwickler-Aktivierpaste verklebt die beiden Filmstreifen

POLAROID-LAND-COLORFILM II

Wo rotes Licht aufgetroffen ist, wird der grünblaue Farbstoff aus der Schicht VIII am Silberkorn der rotempfindlich gewesenen Schicht VII festgehalten. Da das rote Licht die grünempfindliche und die blauempfindliche Schicht (IV und I) nicht belichten konnte, können die dort von der Aktivierungspaste angeregten und von den zugehörigen Entwicklern freigemachten Farbstoffe Purpur und Gelb frei bis zur farbfesthaltenden Positivschicht wandern. Gelb und Purpur gibt gemischt die rote Farbe auf dem Positiv. Blaues Licht hat nur die blauempfindliche Schicht I belichtet. Dort entstehender gelber Farbstoff wird von den Silberkörnern adsorbiert. Aber nun kann der aus Schicht V kommende purpurne und der aus Schicht VII kommende eisblaue Farbstoff ungehindert bis zur Positivschicht vordringen; beide Farbstoffe werden dort festgehalten und gemischt, aus Purpur und Eisblau entsteht Blau. Entsprechendes geschieht dort, wo das Farbnegativ von grünem Licht belichtet wurde. Nur die zur grünempfindlichen Schicht gehörende purpurne Farbe wird von den Silberkristallen zurückgehalten, die eisblaue und die gelbe Farbe wandern ungehindert zur Positivschicht, beide Farbanteile werden festgehalten und gemischt, es entsteht Grün. Bei weißem Licht werden alle Farben zurückgehalten, denn alle drei farbempfindlichen Schichten werden belichtet und das Silberkorn hält in allen drei Schichten die Farbstoffe zurück. Beim schwarzen Bildanteil wird keine Farbe zurückgehalten und alle drei Farbstoffe treffen auf die Positivschicht; ihre Mischung ergibt Schwarz.

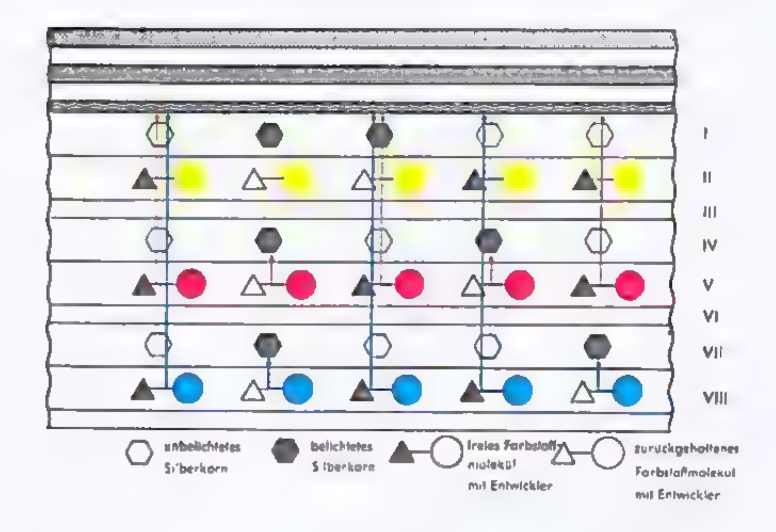


Abb. 3 Der Entwicklungsvorgang

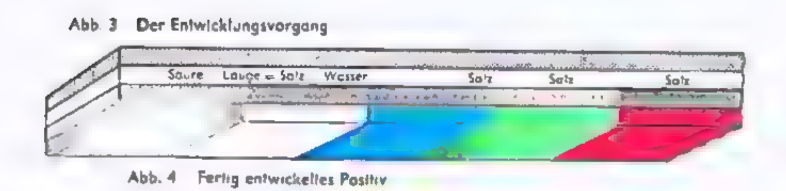


Abb. 4 Fertig entwickeltes Positiv

POLAROID-LAND-COLORFILM III

Das entstandene Positivbild ist wegen des Entwickleranteils der Moleküle stark alkalisch und würde am Luftsauerstoff verderben. Darum besitzt das Positivpapier außer der Kunststoffschicht, die die Farbanteile festhält, noch eine wasserlösliche Kunststoffschicht, die von den Alkaliionen durchdrungen wird, und eine saure Empfängerschicht für das Alkali. In dieser wird das Alkali neutralisiert, wobei sich Wasser bildet. Dieses löst die Zwischenschicht, worauf Wasser und Säure in die Farbstoffempfängerschicht gelangen, das Farbstoffbild von Salzanteilen freiwaschen und ihm einen stabilisierenden sauren Charakter geben. Das Farbbild ist ohne Nachbehandlung haltbar und gegen Lichteinflüsse widerstandsfähiger als chromogen entwickelte, herkömmliche Farbphotos. Auf die Dauer des Entwicklungsprozesses hat die Temperatur Einfluß; die Entwicklung ist bei Normaltemperatur von 20—24° C nach 50 s, bei 15—16° C nach 60 s, bei weniger als 7° C nach 90 s durch Trennen von Negativ- und Positivstreifen zu unterbrechen.

Beim Polaroid-Land-Schwarzweißprozeß diffundieren die zum Aufbau des Negativs nicht verbrauchten Silberhalogenidkörner (in Form von Silberthiosulfatsalzen) in die silberkeimhaltige Empfängerschicht des Übertragungspapiers und werden dort als Positiv festgehalten. Der Prozeß dauert 10—30 s; bei neueren Filmen entfällt die übliche Nachbehandlung der Bilder durch Lackieren.

SETZEREI I (HANDSATZ)

Die Drucktypen

Die Drucktypen (Lettern) bestehen zu etwa 70% aus Blei, zu 25% aus Antimon und zu 5% aus Zinn. Jeder Buchstabe hat an der Vorderseite eine Einkerbung, die Signatur (Abb. 1b). Sie dient einmal zur Unterscheidung der einzelnen Schriften, zum anderen als Standkontrolle für den Setzer beim Setzen.

Der Setzer rechnet nicht nach Zentimetern. Er hat sein eigenes typographisches Maß. Bei dieser international gültigen Maßeinteilung entsprechen 2660 typographische Punkte einem Meter.

Die Schriften (sie tragen meist den Namen des Schriftkünstlers, der sie entwarf) gibt es in verschiedenen Größen (Nonpareille, Petit, Korpus, Cicero usw.) und Stärken (mager, gewöhnlich, halbfett, fett usw.). Man spricht dann von „Schriftfamilien". Die nichtdruckenden Teile eines Satzes nennt man Blind- oder Füllmaterial. So gibt es als Wortzwischenraum den Ausschluß, zum Füllen auslaufender Zeilen die Quadrate, zur Erweiterung des Zeilenabstandes die Regletten und zur Bildung großer nichtdruckender Flächen die Stege.

Das Setzen

Der Handsetzer arbeitet vor einem schrägen Regal (Abb. 2), auf das der Setzkasten „aufgeschoben" ist. Der Setzkasten enthält etwa 130 verschieden große Fächer, in denen die Buchstaben untergebracht sind. Im Oberteil des Setzkastens befinden sich die Großbuchstaben (Versalien), die — mit einer Ausnahme (J) — in alphabetischer Reihenfolge geordnet sind. Die Kleinbuchstaben (Gemeinen) liegen im unteren Teil des Schriftkastens. Sie sind so eingelegt, daß die am meisten gebrauchten Typen (e, n) der Hand am nächsten liegen. Diese Buchstaben haben ein besonders großes Fach und am linken Rand des Kastens meist noch ein Reservefach. Daneben liegen im Schriftkasten noch Ziffern, Satzzeichen, Umlaute, Akzente und verschiedene Stärken Wortzwischenraum (Ausschluß). Ein großer Schriftkasten enthält etwa 30 kg, ein kleiner etwa 12–15 kg Schrift.

Zum Setzen hat der Setzer eine Setzvorlage, das Manuskript. Er hält in der linken Hand seinen Winkelhaken (Abb. 3), den er auf die gewünschte Zeilenbreite eingestellt hat. Auf die im Winkelhaken befindliche Setzlinie reiht er mit der rechten Hand Drucktype an Drucktype. Der Daumen der linken Hand hält die Drucktypen fest. Er gleitet dabei über die Signatur und prüft, ob die Drucktype richtig steht.

Zwischen jedes Wort wird ein Zwischenraum gesetzt. Ist die Zeile gefüllt, wird dieser Wortzwischenraum entweder erweitert oder verringert, damit alle Zeilen die gleiche Breite haben (Ausschließen).

Ist der Winkelhaken gefüllt, werden die Zeilen auf ein Setzschiff ausgehoben. Nach mehrmaligem Ausheben entsteht eine Seite (Kolumne). Diese Kolumne wird mit einer festen Schnur ausgebunden (Abb. 4). Der dann auf der Handpresse gefertigte Abzug wird korrigiert.

Bei dem nun folgenden Druck wird der Satz (eine Hochdruckform) in einem rechtwinkeligen Schließrahmen mit Schließzeugen fest eingespannt (Formenschließen; Abb. 5).

Nach erfolgtem Druck wird die Druckform aufgelöst und Drucktypen und Blindmaterial zur Wiederverwendung in die entsprechenden Schriftkästen abgelegt (Abb. 6).

Heute werden in der Setzerei nur noch wenige Arbeiten im Handsatz hergestellt. Dabei handelt es sich vorwiegend um sog. Akzidenzen (Briefbogen, Familiendrucksachen usw.) oder schwierigen wissenschaftlichen Satz (Formeln, Tabellen). Zum Satz anderer Drucksachen (Bücher, Zeitungen, Zeitschriften) bedient man sich fast ausschließlich des Maschinensatzes (s. S. 692).

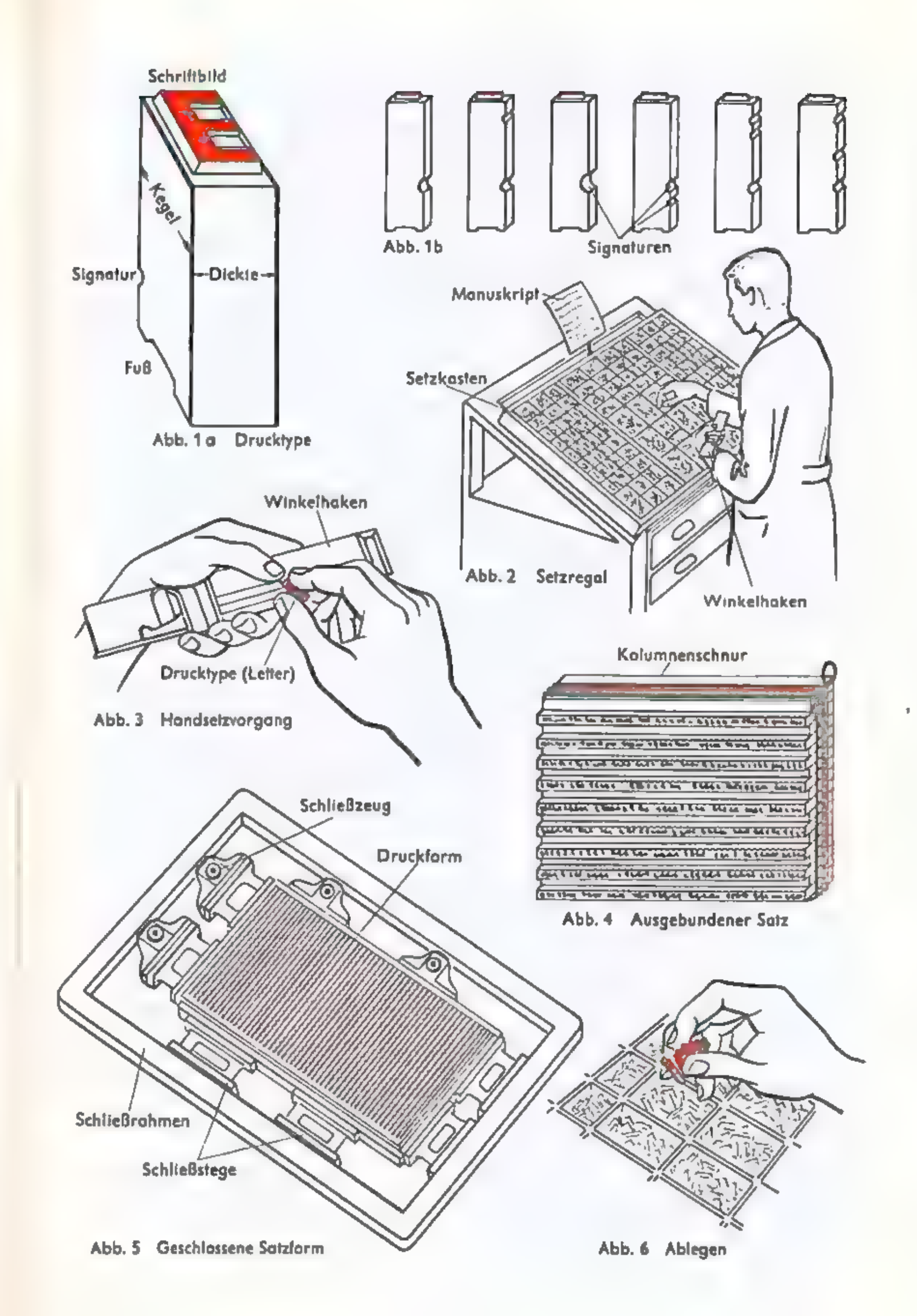


Abb. 1a Drucktype

Abb. 1b

Abb. 2 Setzregal

Abb. 3 Handsetzvorgang

Abb. 4 Ausgebundener Satz

Abb. 5 Geschlossene Satzform

Abb. 6 Ablegen

SETZEREI II
(MASCHINENSATZ, SETZMASCHINEN)

Die Vorteile der Setzmaschinen gegenüber dem Handsatz ergeben sich aus der größeren Setzgeschwindigkeit und aus der Verwendung ständig neugegossener klarer Schrift, die zudem nicht abgelegt zu werden braucht, da sie nach dem Druck eingeschmolzen wird; das Metall wird danach wiederum den Gießmaschinen zugeführt.

In *Zeilensetz- und -gießmaschinen* (Beispiel: Linotype) erfolgt sowohl das Setzen, also das Aneinanderreihen von Matrizen, als auch das Ausgießen und damit die Fertigstellung der Zeile in der gleichen Maschine. Vor der Maschine sitzt der Setzer und bedient nach Maßgabe des Manuskripts mit beiden Händen die Tastatur. Die Buchstabenanordnung entspricht etwa der einer Normalschreibmaschine. Jeder Fingerdruck löst aus dem Magazin den Fall einer Matrize (Abb. 3) aus. Sie gleitet durch Führungsbleche über ein Förderband zum Sammler (Abb. 1). Sondermatrizen, die rechts neben der Tastatur in Handmatrizenkästen liegen, können der Matrizenreihe in beliebiger Anzahl hinzugefügt werden. Wortzwischenräume stellt man mit sogenannten Spatienkeilen her, die beim Ausschließen der Zeile auseinandergetrieben werden. Das geschieht im Gießapparat, in den die aneinandergereihten Matrizen durch Hebeldruck transportiert werden. Nach dem Abguß werden die fertigen Zeilen am Fuß beschnitten und auf ein Setzschiff ausgestoßen. Ein Greifer transportiert nach dem Abguß die unterschiedlich gezahnten Matrizen auf eine Transportspindel, die das Ablegen in die Fächer des Magazins automatisch besorgt. So befinden sich die Matrizen in ständigem Umlauf. Während des Gieß- und Ablegevorganges wird ohne Unterbrechung weiter gesetzt. Da die Maschine den Satz in festen Zeilen gießt (Abb. 4), erfolgen Korrekturen durch Neusetzen der betreffenden Zeilen.

Im Gegensatz dazu erfolgt in der Einzelbuchstabensetz- und -gießmaschine der Abguß Drucktype um Drucktype, die zu Zeilen zusammengestellt werden (Abb. 8). Der Vorteil gegenüber der Zeilensetz- und -gießmaschine liegt in der vielseitigeren Anwendungsmöglichkeit bei bestimmten Setzarbeiten, da sich Korrekturen und Ergänzungen leichter bewerkstelligen lassen. Bei der Monotype-Setzmaschine wird die Setz- und Gießmaschine durch Lochband (Abb. 6) gesteuert, das nach dem Manuskript auf einer gesonderten Maschine, dem sogenannten Taster (Abb. 5), hergestellt wird.

Während die genannten Bleisetzmaschinen durch Setzen und Gießen eine fertige Hochdruckform herstellen, erzeugen die Licht- (oder auch Photo-)setzmaschinen auf photographischem Wege eine kopierfähige Satzvorlage. Das geschieht mit Hilfe von Transparent-Matrizen oder durch Punktaufbau des Einzelbuchstabens. Als Beispiel ist in Abb. 9 die MONOPHOTO-Lichtsetzmaschine gezeigt, die die Einzelbuchstaben mit Hilfe eines alle Zeichen enthaltenden Negativrahmens auf Film belichtet. Die in Photosetzmaschinen (es gibt auch kleinere Geräte für den Titel- und Akzidenzsatz) gefertigten Satzkopiervorlagen dienen der Herstellung von Druckplatten für den Offset-, Tief- oder Buchdruck.

Zur Vereinfachung des Satzvorganges, aber auch zur Überbrückung des Raumes und zur Beschleunigung werden Setzmaschinen heute fast ausschließlich durch Steuerbänder (Lochstreifen, Magnetbänder) gesteuert. Mit Hilfe der Datenverarbeitung und entsprechend entwickelter Programmierung ist es möglich, Arbeiten wie Schriftwahl, Ausschließen, Worttrennung, Absätze, Umbruch, Sperren, Auszeichnen, Einziehen usw. automatisch mit entsprechenden Steuerstreifen und Satzrechnern durch die Setzmaschine auszuführen. So kann man z. B. mit Hilfe eines Steuerstreifens zentral von einer Stelle aus über Draht oder Funk mehrere Setzmaschinen an verschiedenen Orten zur Herstellung des gleichen Setzproduktes veranlassen (Fernsatz).

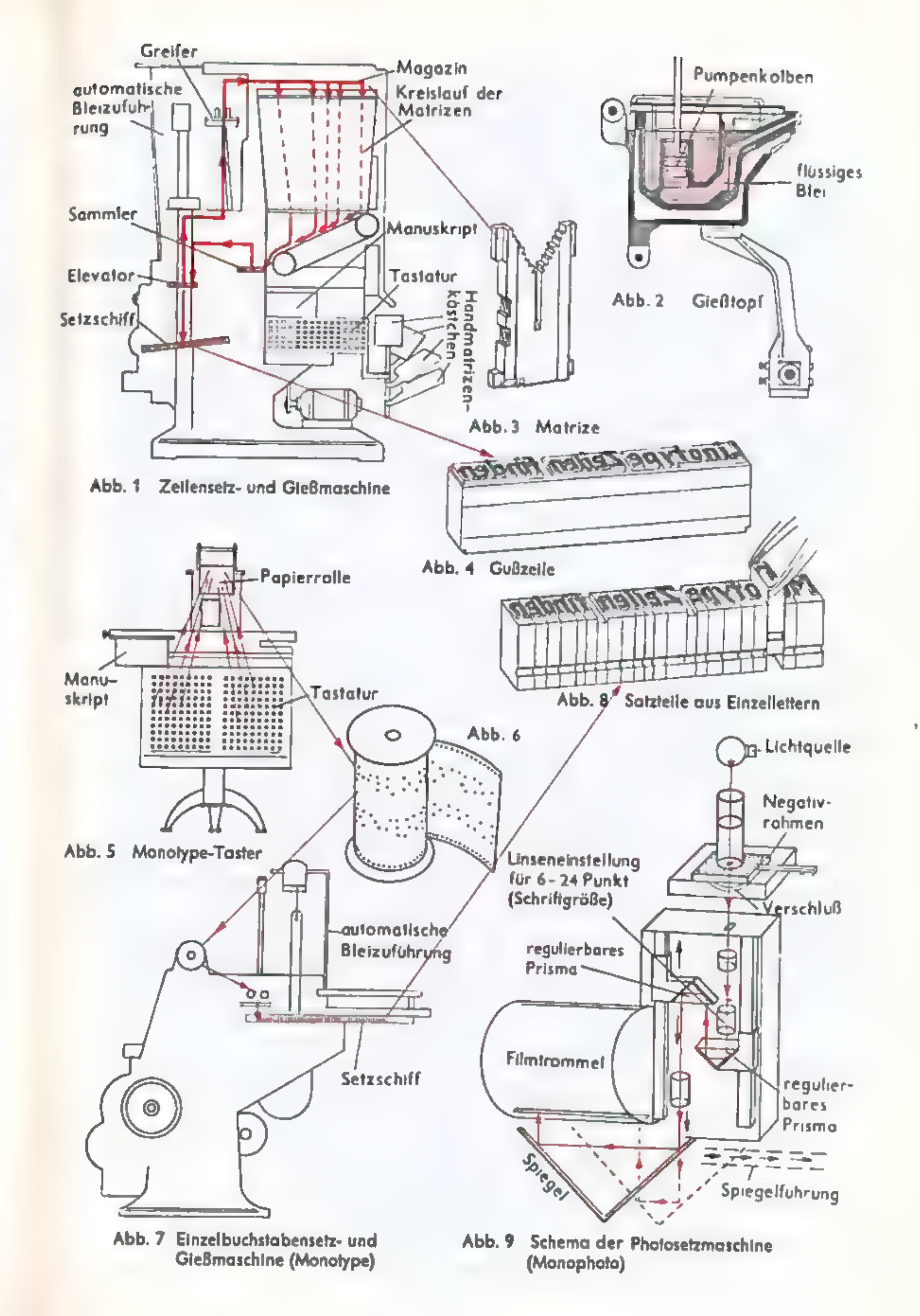


Abb. 1 Zeilensetz- und Gießmaschine

Abb. 2 Gießtopf

Abb. 3 Matrize

Abb. 4 Gußzeile

Abb. 5 Monotype-Taster

Abb. 7 Einzelbuchstabensetz- und Gießmaschine (Monotype)

Abb. 8 Satzzeile aus Einzelletter

Abb. 9 Schema der Photosetzmaschine (Monophoto)

BUCHDRUCK (HOCHDRUCKVERFAHREN)

Der Buchdruck, eines der ältesten heute noch angewandten Druckverfahren, gehört zur Gruppe der Hochdruckverfahren, bei denen die Druckelemente höher liegen als die nichtdruckenden Teile der Druckform. Somit erhalten nur die Druckelemente vor dem Druckvorgang Farbe und nur sie kommen während des Druckvorganges mit dem Druckträger in Berührung und geben einen Teil der Farbe an diesen ab.

In der Frühzeit des Buchdruckes druckte man nur mit Preßstempeln. Auf einer horizontal verschiebbaren Unterlage lag die eingefärbte Druckform, das Papier wurde als Bogen aufgelegt und unter den Druckstempel geschoben. Mit einem langen Hebelarm, dem Preßbengel, wurde eine daran befestigte Schraubspindel gedreht und dadurch der Stempel fest auf das Papier gepreßt. Durch den starken, auf die ganze Fläche wirkenden Druck wurde eine gut ausgedruckte Form gewährleistet (Abb. 1). Diese Art des Druckens finden wir auch heute noch beim Holzschnittdruck, der vorwiegend von Künstlern gepflegt wird, und in moderner Form bei den Tiegeldruckmaschinen (Abb. 2). Während beim Handdruck das Einfärben der Form durch eine mehrfach über die Druckform geführte Farbwalze erfolgt, muß die gründliche Einfärbung im maschinellen Druck in einem Arbeitsgang erzielt werden. Zur feinen, gleichmäßigen Verteilung der Farbe sind daher komplizierte, aus vielen Walzen bestehende Farbwerke erforderlich. Während die Tiegeldruckmaschine nach dem Druckprinzip flach/flach (ebene Druckform gegen ebenen Gegendruckkörper, Tiegel) arbeitet, verwendet man in der Zylinder/Flachform-Buchdruckmaschine einen runden Gegendruckkörper (Druckzylinder), der in der Maschine fest gelagert ist, während die auf einem fahrbaren Schlitten (Fundament) liegende Druckform unter dem Druckzylinder durchgefahren wird. Das Papier wird dabei in Bogenform über den Druckzylinder geführt, hier von Greifern gehalten, und zwischen Druckform und Druckzylinder abgerollt (Abb. 3). Dieses Verfahren erlaubt höhere Druckgeschwindigkeiten und größere Druckformen, verwendet aber größtenteils noch die aus vielen Einzelbuchstaben oder Bildteilen zusammengesetzte, in einem Schließrahmen geschlossene Druckform.

Die Herstellung der Hochdruckformen erfolgt neben dem Bleisatz mit Hilfe der chemigraphischen Ätzung oder der elektronischen Gravur. Hochdruckplatten werden als Einzeldruckplatten oder auch als Ganzformdruckplatten (zum Aufspannen auf den Formzylinder) verwendet. Zur Schonung der Originaldruckform oder zur Reduzierung der für die festgelegte Auflagenhöhe erforderlichen Druckanzahl werden Duplikatformen hergestellt. Hierzu dienen die Stereotypie und die Galvanoplastik.

Als Mater (Abb. 4) bezeichnet man eine Gießform, die durch Aufpressen einer starken, feuchtgehaltenen Papierplatte auf die Originaldruckform entsteht. Diese Papierform erlaubt bei sorgfältiger Arbeit bis zu 20 Abgüsse. Als Gießmaterial wird eine Mischung von 75—82 Teilen Blei, 15—20 Teilen Antimon und 3—5 Teilen Zinn verwendet. Je höher der Antimonanteil ist, um so härter ist die Druckform. Jetzt rotiert die Druckform genauso wie der Druckzylinder; das Papier wird nun nicht mehr als Bogen, sondern von großen Papierrollen laufend als Bahn zwischen beiden Zylindern durchgeführt und nach erfolgtem Druck zu Bogen und Seiten zerschnitten. So erzielt man die höchste Druckgeschwindigkeit. In den modernen Zeitungsdruckereien gibt es wahre Maschinenungeheuer, z. T. von mehr als 20 m Länge, die, mit mehreren Druckwerken ausgerüstet, in der Lage sind, komplette Zeitungsausgaben in einem Druckgang mit parallelen Arbeitsabläufen zu drucken. Im Grunde handelt es sich hierbei nur um mehrere hintereinandergekoppelte Rotationsdruckmaschinen (Abb. 5).

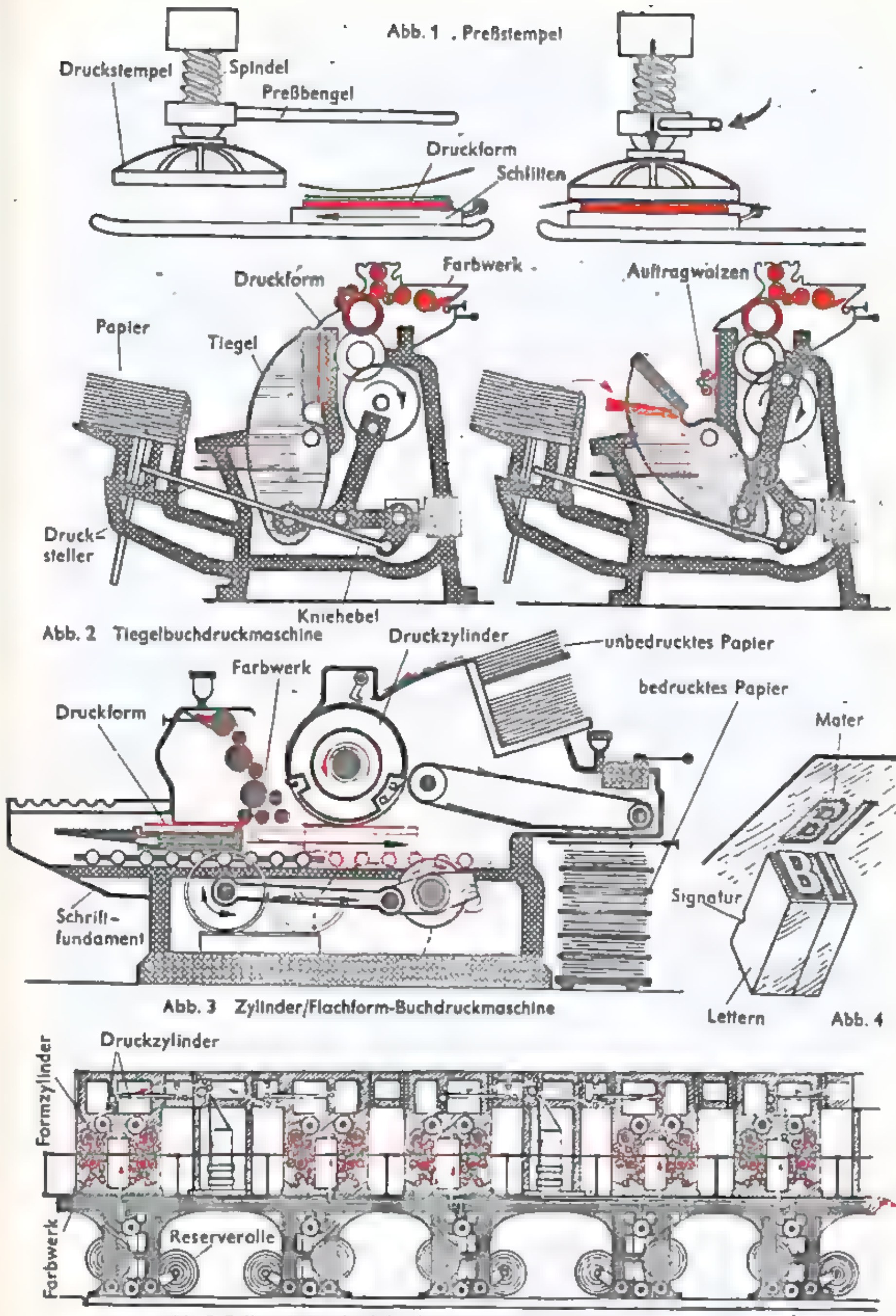


Abb. 1 . Preßstempel

Abb. 2 Tiegelbuchdruckmaschine

Abb. 3 Zylinder/Flachform-Buchdruckmaschine

Abb. 4

Abb. 5 Rollenrotationshochdruckmaschine für Zeitungsdruck

TIEFDRUCK

Der Tiefdruck druckt von einer Reliefdruckform, bei der die Vertiefungen die Druckfarbe aufnehmen und an den Bedruckstoff abgeben. Je nach Art der Druckform wird zwischen Stichtiefdruck und Rastertiefdruck (Abb. 3) unterschieden.

Das älteste Verfahren ist der Kupferstich: In eine polierte Kupferplatte werden mit feinen Grabsticheln Linien gestochen, die die Druckfarbe aufnehmen. Aus dem Kupferstich entwickelte sich die Radierung: In eine polierte, mit einem Ätzgrund überzogene Kupferplatte wird mit einer feinen spitzen Stahlnadel mit leichten Strichen die Zeichnung eingeritzt, so daß das blanke Metall sichtbar wird. Dann werden diese Linien mit Eisenchlorid oder Schwefelsäure tief geätzt. Ein anderes Verfahren ist die Kaltnadelradierung: Hierbei werden die Linien mit einer Stahlnadel direkt in die Druckplatte eingerissen. Dabei entsteht ein mehr oder weniger starker Grat, der Farbe festhält und beim Druck eine gewisse Weichheit der Linien bewirkt (Abb. 1 a u. 1 b). Die Druckfarben werden mit Färbeballen in die vertieften Linien gerieben, der Farbüberschuß wird abgenommen. Nur in den Linien bleibt die Farbe zurück. Das zum Drucken verwendete Papier ist besonders saugfähig und stark, es wird zudem vor dem Druck noch angefeuchtet, denn es muß sich in die Vertiefungen der Platte einpressen lassen; über das Papier werden weiche Filztücher gelegt. Die unter starkem Druck stehende Druckwalze arbeitet ungefähr wie eine Wäschemangel und preßt das Papier auch in die feinsten Linien (Abb. 2). Diese alten Techniken werden noch heute von Malern und Graphikern gepflegt.

Der moderne Tiefdruck bedient sich schneller Bogen- und Rollen-Rotationsmaschinen, die aber alle nach dem oben angeführten Prinzip arbeiten. Bei der Druckformenherstellung wird neben Photographie auch elektron. Gravur angewandt. Man kann, genau wie im Hochdruck, eigentlich alles, von der feinen Strichzeichnung bis zur Farbphotographie, drucken. Nur für den Druck von großen gedeckten Flächen und für den Holzschnitt ist das Verfahren weniger geeignet. Im Gegensatz zum Stichtiefdruck, bei dem die druckenden Elemente in ihrer Bildstruktur vertieft in der Druckform liegen, wird beim Rastertiefdruck die Druckform mit Hilfe eines Rasters in viele kleine Einzelnäpfchen von gleicher Größe jedoch verschiedener Tiefe zerlegt. Dazu verwendet man eine Kristallglasplatte, die mit einem dichten Netz sich kreuzender Linien überzogen ist. Jedes dadurch entstehende kleine Glasfeld wirkt wie eine Photolinse, ihre Vielzahl zerlegt das Ton- in ein Punktbild, wobei die in die Kupferhaut des Formzylinders geätzten Näpfchen je nach Tonwert des Originals und nach dem verwendeten Raster flacher oder tiefer werden. Neben der konventionellen Aufrasterung wird auch halbautotypische (Näpfchen haben sowohl unterschiedliche Ausdehnung als auch verschiedene Tiefe) und autotypische (Näpfchen variieren in der Ausdehnung bei nahezu gleicher Tiefe) Rasterung angewandt.

Für den Tiefdruck ist eine Vielzahl von Druckmaschinen entwickelt worden, wie z. B. die in Abb. 4 gezeigte Bogenrotationsdruckmaschine. Im Druckprinzip gleichen sie den Buchdruckmaschinen, nur wird hier beim Bogendruck überwiegend die Rotationsmaschine eingesetzt. Der Formzylinder wird von einem Farbwerk mit dünnflüssiger, durch Verdunstung trocknender Druckfarbe eingefärbt, die alle Rasternäpfchen und Linien ausfüllt. Der Farbüberschuß wird von einem sorgfältig geschliffenen Metallineal, der Rakel, von den Stegen der Druckform abgestreift. Es kommen die verschiedensten Einfärbsysteme zur Anwendung, z. B. die Einfärbung bei direktem Lauf des Formzylinders im Farbtrog (Abb. 5). Das Papier wird dabei durch einen Druckzylinder gegen den einfärbenden Formzylinder gepreßt.

Die Abb. 6 zeigt das Arbeitsprinzip einer Rollenrotationstiefdruckmaschine mit zwei Druckwerken und anschließendem Falzwerk.

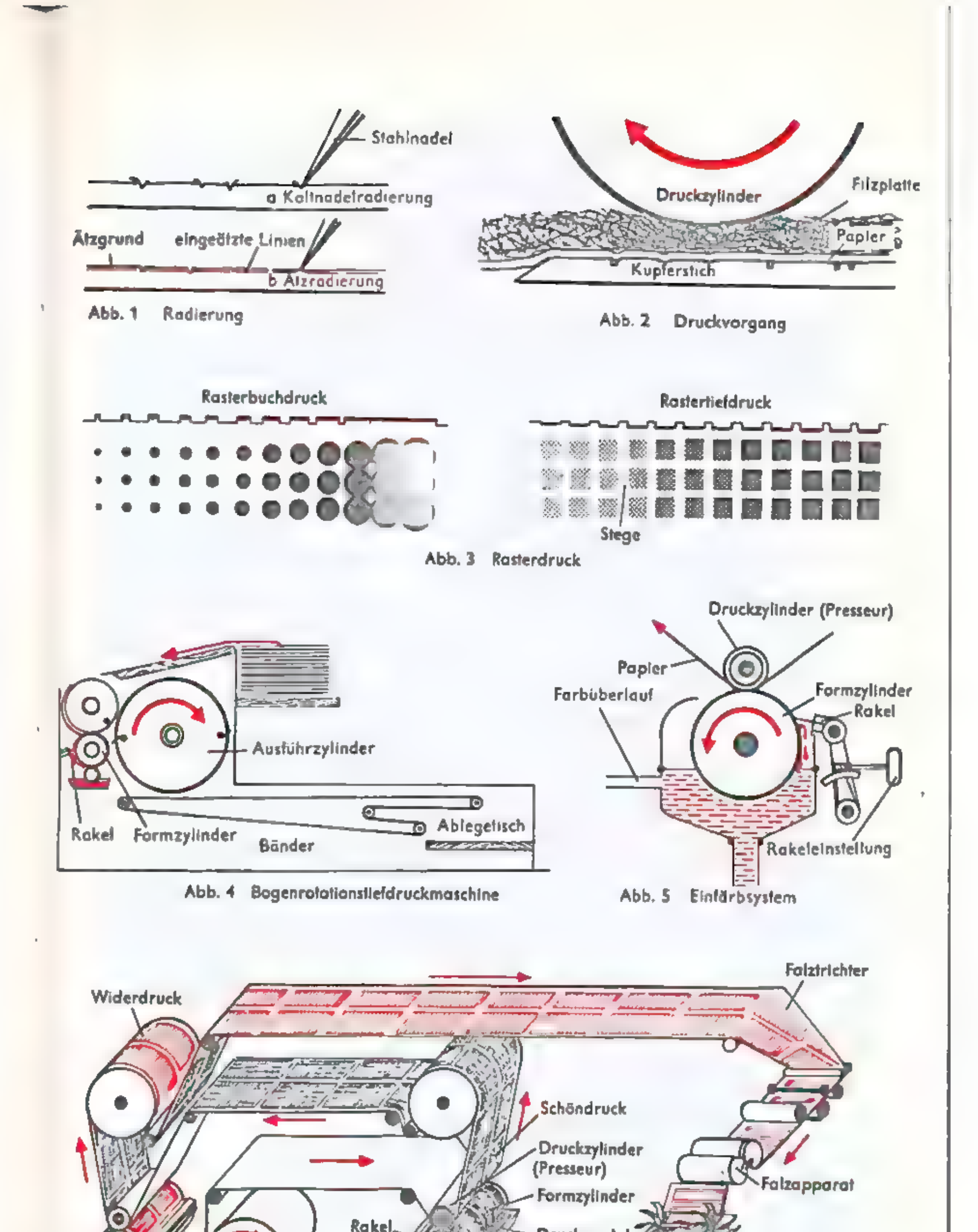


Abb. 1 Radierung

Abb. 2 Druckvorgang

Abb. 3 Rasterdruck

Abb. 4 Bogenrotationstiefdruckmaschine

Abb. 5 Einfärbsystem

Abb. 6 Rollenrotationstiefdruckmaschine

FLACHDRUCKVERFAHREN I
(STEIN- UND OFFSETDRUCK)

Die Flachdruckverfahren beruhen auf der Tatsache, daß sich bestimmte Substanzen nicht miteinander mischen lassen, z. B. Fett und Wasser, die einander abstoßen. Wenn man eine flache Stein- oder Metallplatte mit einer Fettfarbe oder Fettkreide bezeichnet und anschließend die ganze Fläche anfeuchtet, so wird das Wasser von den bezeichneten Stellen abgestoßen, während die unbezeichneten Flächen das Wasser festhalten und feucht bleiben. Dieser Effekt ist besonders stark, wenn man Material wie Solnhofener Schiefer verwendet, der sehr gut Feuchtigkeit an seiner Oberfläche hält, oder wenn man die Metallplatte aufrauht (körnt). Überwalzt man die Druckform mit einer fettigen Farbe, so stoßen die wäßrigen Partien diese ab, die Zeichnung jedoch nimmt die Farbe an. Aufgrund dieses Effektes liegen die druckenden Stellen in der gleichen Ebene wie die nichtdruckenden. Unterschiede ergeben sich nur an wasserannehmenden und wasserabstoßenden Partien. Zu den Flachdruckverfahren gehören der Steindruck, der Zinkdruck und der Lichtdruck (s. S. 700) sowie die indirekten Verfahren des Offsetdrucks und des Blechdrucks. Abb. 1 zeigt den *Steindruck*. Das Einfärben erfolgt von Hand mit einer Lederwalze (Abb. 1 a). Zum Druck wird über das Druckpapier feste Pappe (Preßspan) gelegt, die mit Talg eingestrichen wird. Von oben wird unter starkem Druck der Reiber auf den Preßspan gesetzt und dann der Stein unter dem Reiber durchgezogen. Der Steindruck wird auch heute noch von Künstlern gepflegt (Lithographie), denn er gestattet es, die Unmittelbarkeit des künstlerischen Striches drucktechnisch ohne große Schwierigkeiten wiederzugeben. Um die Zeichnung fester an den Stein zu binden, werden die freien Stellen auf chemischem Wege schwach geätzt. Nach Vollendung der Druckauflage läßt sich der bis zu 8 cm starke Stein aus Solnhofener Schiefer mit Schleifsteinen abschleifen und neu verwenden. Ähnlich wie der feinschichtige gelbgraue Solnhofener Schiefer reagieren auch manche Metalle; sie lassen sich genauso verwenden wie Stein (besonders werden Zink- und Aluminiumplatten verwendet). Metallplatten haben noch den Vorteil, daß sie sich zum Zylinder biegen und für den Rotationsdruck verwenden lassen. Druckt man auf diese Weise von einer seitenrichtig behandelten Metallplatte ein spiegelverkehrtes Bild auf einen mit Gummituch bespannten Zylinder, der seinerseits den Bedruckstoff bedruckt, so handelt es sich um den indirekten Flachdruck, der als Offsetdruck (Abb. 2) bekannt ist. Dieses indirekte Druckverfahren bietet gegenüber dem direkten Druck große Vorteile, z. B. gutes Anpassen an rauhere Papiere usw., so daß es heute sehr häufig angewandt wird. Natürlich wird auch hier Photographie und Rastertechnik in den Dienst des Verfahrens gestellt. Durch Aufbringen quellfähiger Kolloidschichten, deren Quellfähigkeit durch Belichten (Einlagerung von Bichromat oder Farbstoffen) beeinflußt wird, werden heute die Kopiervorlagen auf die Druckform übertragen.

Das Druckwerk der Offsetdruckmaschine besteht aus dem Formzylinder, dem Gummituch- und dem Druckzylinder sowie dem Farbwerk und Feuchtwerk (Abb. 3). Die Druckqualität wird von der Anzahl der Farb-, Reib- und Auftragswalzen beeinflußt. Bei der in Abb. 5 gezeigten Vierfarben-Rollenrotationsmaschine sind um zwei Druckzylinder je vier Druckwerke angeordnet. Der Druck erfolgt im rechten Druckwerk als Schöndruck, am linken als Widerdruck (s. S. 696).

Ein modernes Verfahren ist der *Bimetalloffsetdruck*. Während Zink- und Aluminiumplatten entweder fett- oder wasserabstoßend präpariert werden müssen, *sind* andere Metalle entweder wasser- oder fettbindend. So kann man z. B. auf wasseranziehendes und fettabstoßendes Grundmetall (Chrom, Nickel) galvanisch eine zweite farbführende (fettanziehende) Metallschicht (Kupfer) aufbringen und an den bildfreien Stellen nach der Kopie wieder wegätzen.

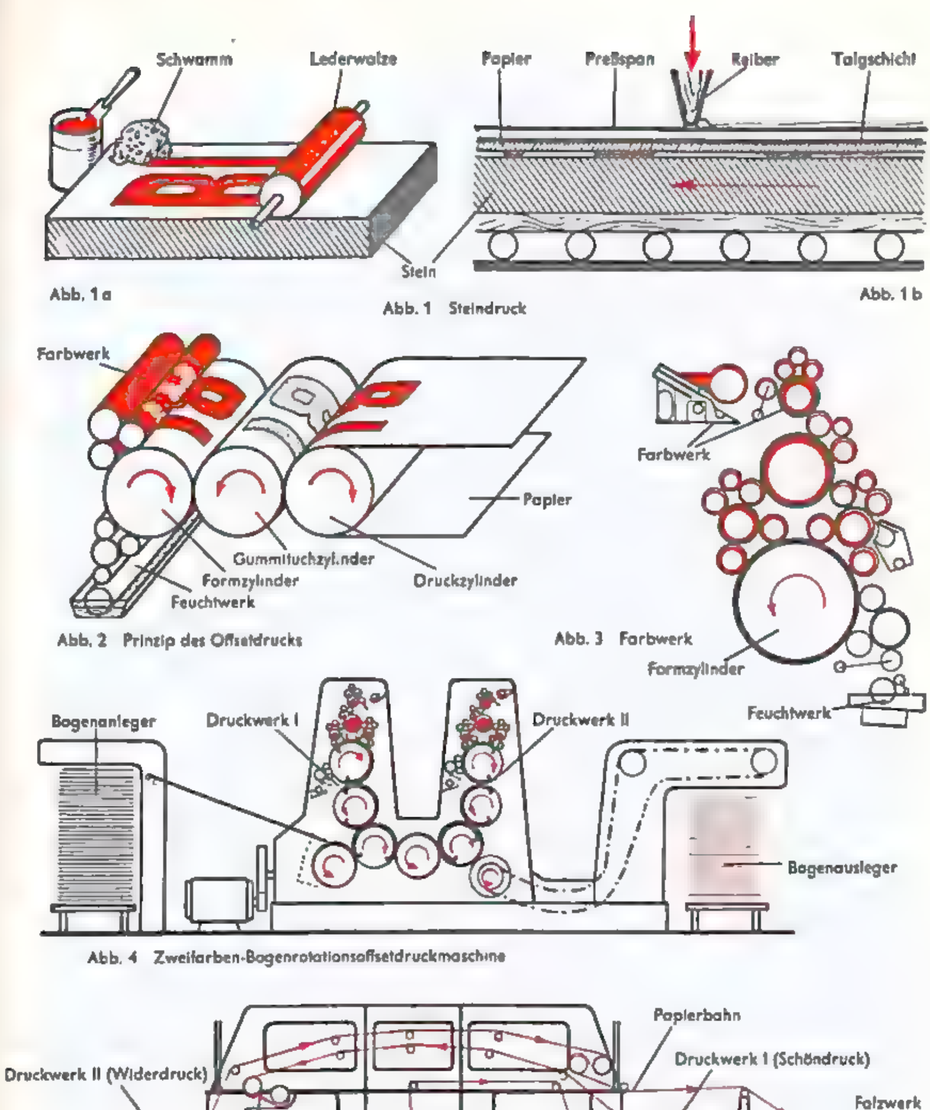


Abb. 1 Steindruck

Abb. 2 Prinzip des Offsetdrucks

Abb. 3 Farbwerk

Abb. 4 Zweifarben-Bogenrotationsoffsetdruckmaschine

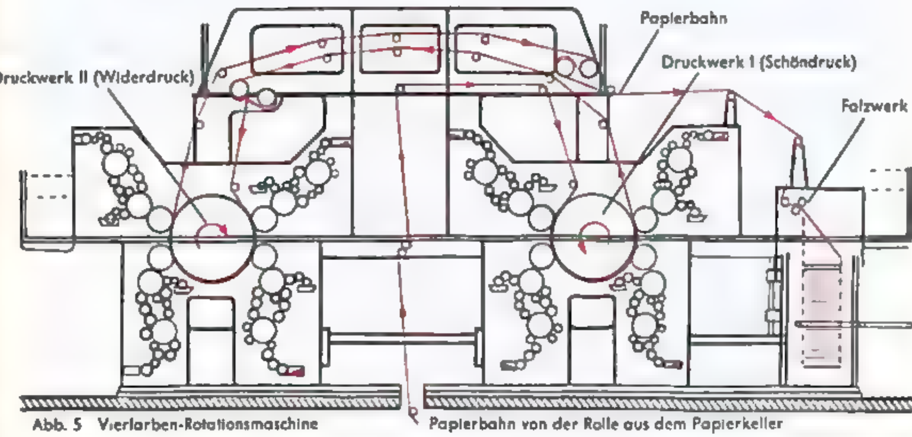
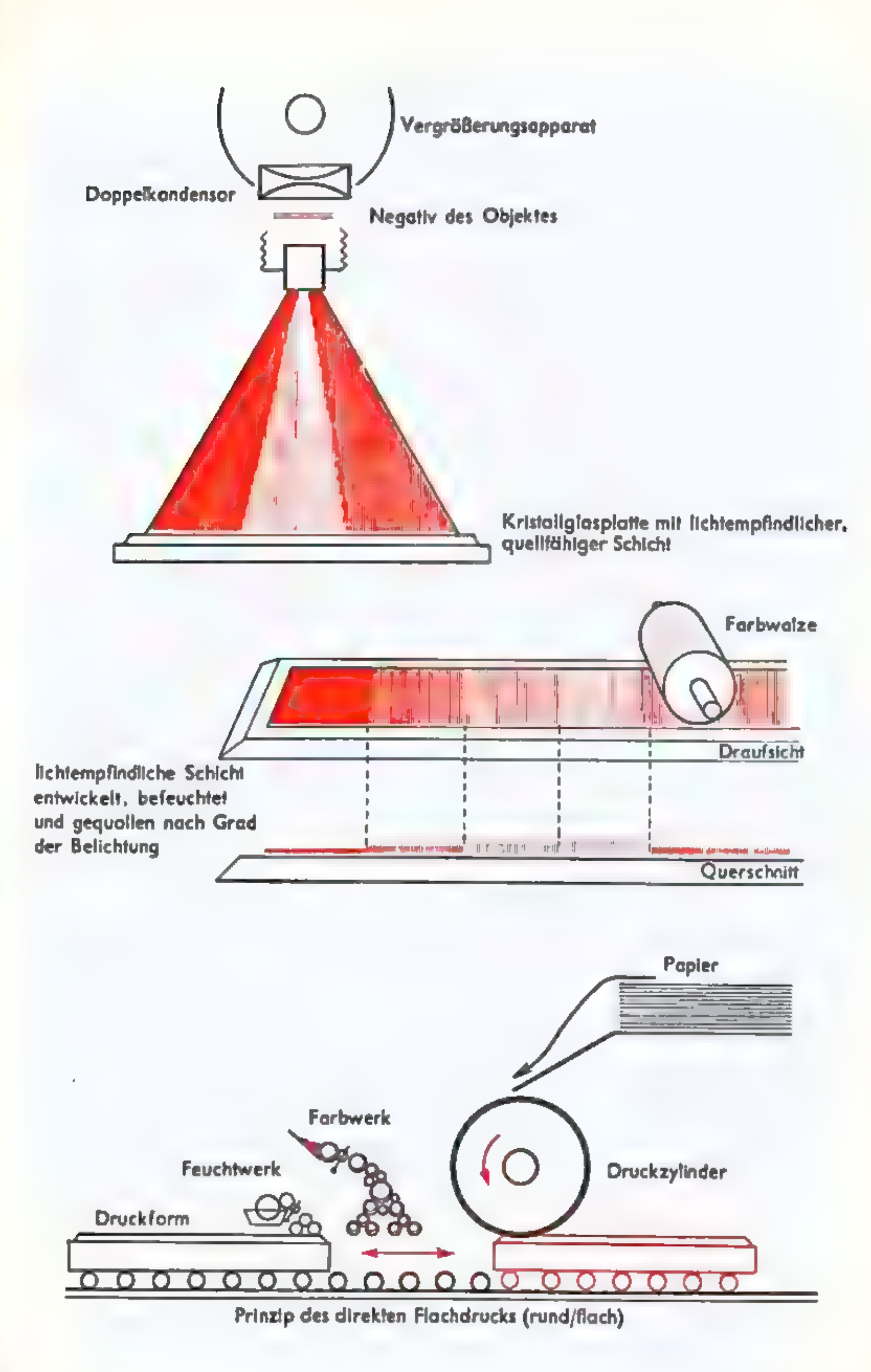


Abb. 5 Vierfarben-Rotationsmaschine

FLACHDRUCKVERFAHREN II (LICHTDRUCK)

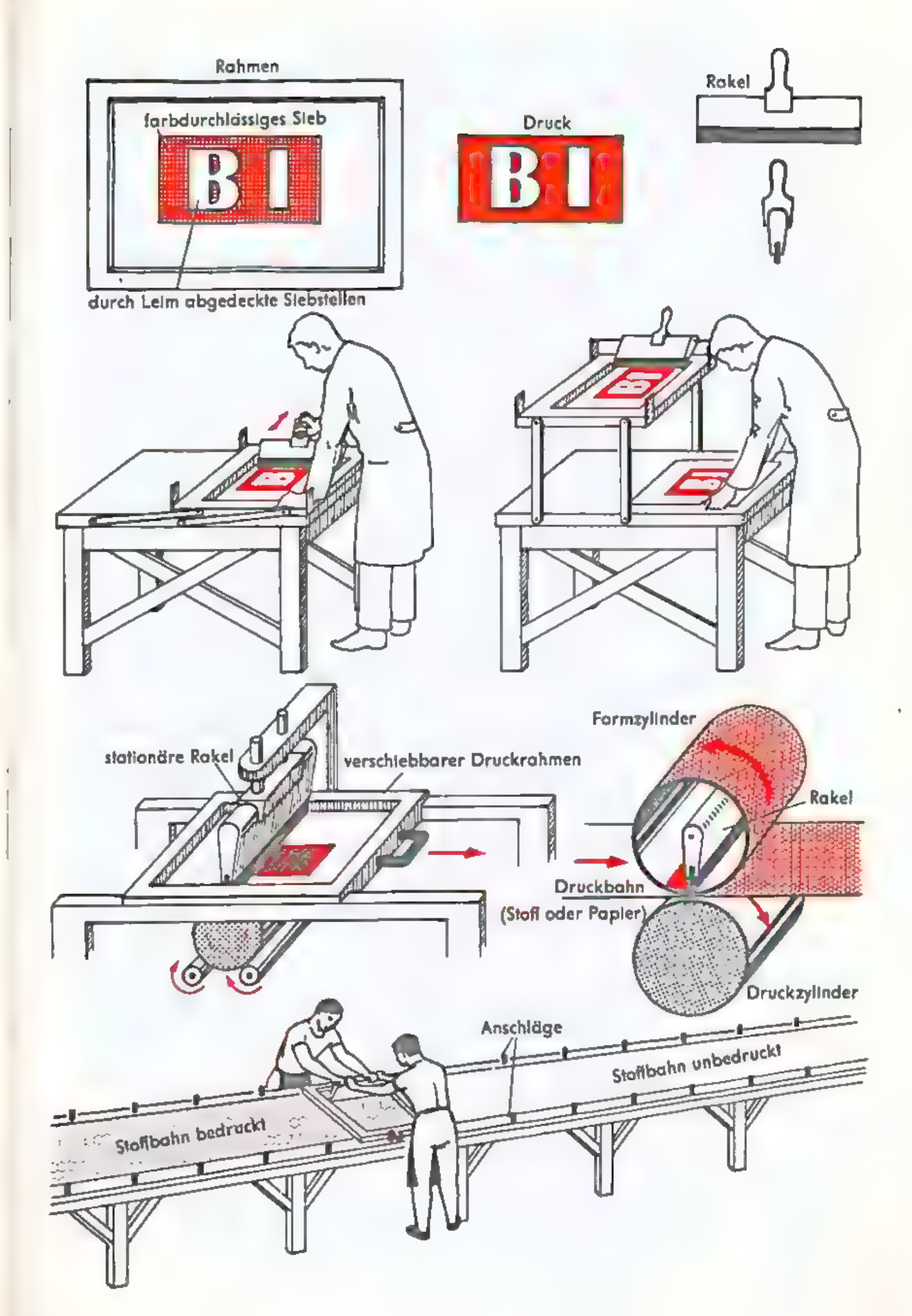
Der Lichtdruck wird den Flachdruckverfahren zugeordnet, obwohl er auch Merkmale des Tiefdrucks aufweist. Die Druckform besteht aus einer Kristallglasplatte, die mit einer 6–8 mm starken Schicht bedeckt ist; diese ist aus einer Gelatinelösung und Kaliumbichromat zusammengesetzt. Sie wird gleichmäßig dick auf die Platte gebracht und in einem Ofen bei etwa 50° C langsam getrocknet. Dabei schrumpft ihre Oberfläche, es entsteht eine gleichmäßige Körnung, das sogenannte Runzelkorn, das man mit bloßem Auge kaum wahrnehmen kann. Die Platte wird durch ein Diapositiv belichtet. Die Schicht büßt je nach Stärke der Lichteinwirkung mehr oder weniger ihre Quellfähigkeit für Wasser ein. Die Halbtonnegative werden ohne Verwendung eines Rasters auf die Platte kopiert. Anschließend wird die Platte für mehrere Stunden in einen Wässerungskasten gestellt. Hier quillt die Chromgelatine entsprechend der unterschiedlichen Belichtung der einzelnen Stellen auf, und das Chromsalz löst sich heraus. Anschließend wird die Platte wieder getrocknet und vor Beginn des Druckes mit einer Mischung aus Glycerin und Wasser angefeuchtet (reines Wasser würde die Schicht langsam auflösen). Diese Mischung läßt die Gelatine entsprechend der Belichtung wieder aufquellen. Die hellen Stellen nehmen viel Feuchtigkeit auf, die stark belichteten sehr wenig, so daß das Bild auf der Schicht wie ein leichtes Relief wirkt. Beim Einwalzen mit Druckfarbe nimmt die Schicht je nach dem Grad der Quellung und der damit verbundenen Feuchtigkeit die Farbe auf. Die trockenen Stellen nehmen die Farbe an, die feuchten weisen sie ab. Die Abstufungen sind wie das Runzelkorn derart fein, daß die größte Originaltreue erreicht wird. Dadurch eignet sich der Lichtdruck in ganz hervorragender Weise zur Wiedergabe von anspruchsvollen Kunstwerken.



Prinzip des direkten Flachdrucks (rund/flach)

SIEBDRUCK

Von Hochdruck, Flachdruck und Tiefdruck unterscheidet sich die Gruppe der Durchdruckverfahren dadurch, daß die Druckfarbe durch die geöffneten Stellen der Durchdruckform hindurch auf den Bedruckstoff gelangt. Diese Art von Druckformen sind allgemein als Schablonen bekannt. Ihre Verwendung zur wiederholten Reproduktion von Darstellungen weicht in primitiver Form bis weit ins Altertum zurück. Eine industriell stark entwickelte Variante des Durchdruckes ist der Siebdruck. Man spricht von Siebdruck, weil für die Druckform ein feines Maschengewebe aus Seide, Metall oder Kunststoff (= Sieb!) verwendet wird, dessen Maschenöffnungen an den nichtdruckenden Stellen verschlossen werden. Der Druckvorgang besteht darin, daß die Druckfarbe (z. B. mit einer Rakel) durch die Öffnungen des Siebes hindurch auf den darunter befindlichen Bedruckstoff befördert wird. Dies kann manuell, aber auch maschinell in Flachform- oder Rotationssiebdruckmaschinen erfolgen.
Die Herstellung der Siebdruckform kann von Hand durch Aufzeichnen der zu druckenden Darstellung auf das Sieb und durch Verschließen der nichtdruckenden Siebstellen mit Leim oder ähnlichen Substanzen sowie durch Aufkleben vorgefertigter Schablonen auf das Sieb erfolgen.
Für den Handsiebdruck (vgl. Abb.) wird das Sieb in einen Rahmen gespannt, der so groß gewählt werden muß, daß am Rand noch genug Platz für die Druckfarbe und auch für eine Rakel bleibt. Die Rakel besteht meist aus einem Griff mit einem breiten Querholz, in das ein fester, plangeschliffener Gummistreifen eingelassen ist. Als Druckunterlage eignet sich jeder Tisch, der eine gute, glatte Platte hat. Für den gewerblichen Druck benutzt man Spezialanfertigungen mit Metall- oder Glasplatten. Das Papier wird auf den Tisch gelegt, unter Umständen durch eine Vakuumeinrichtung festgehalten, das Sieb mit der Druckform wird aufgebracht und an der einen Seite des Siebes die Druckfarbe in dicker Lage aufgegeben. Mit der Rakel zieht man nun die Farbe unter gleichmäßigem Druck auf die andere Seite des Siebes und drückt dabei einen Teil durch die offengehaltenen Stellen auf das Papier.
Bei den photomechanischen Verfahren bringt man eine lichtempfindliche Schicht auf das Sieb; sie wird nach dem Antrocknen durch ein Vorlagenegativ im Kontakt belichtet. Durch die Lichteinwirkung werden die belichteten Stellen fest, die unbelichteten lassen sich auswaschen. Das indirekte Verfahren verwendet eine lichtempfindliche Stripfolie, deren Schicht nach der Belichtung und Präparierung auf das Sieb übertragen wird. Diese Verfahren erlauben ein außerordentlich feines Arbeiten, so daß auf diese Weise auch Rasterarbeiten ausgeführt werden können.
Die Feinheit der Siebe, die Konsistenz der Druckfarbe dem jeweiligen Verwendungszweck entsprechend zu wählen, ist die Aufgabe des erfahrenen Druckers.
Auch in der Textilindustrie wird der Siebdruck, hier Filmdruck genannt, angewandt. Für das Bedrucken von Stoffbahnen sind lange Tische erforderlich, auf denen die Stoffbahnen durch einen leicht löslichen Trockenleim festgehalten werden. Am Tischrand sind Anschläge in der Breite der Druckvorlage befestigt. Nach jedem Druck wird die Form bis zum nächsten Anschlag weitergedrückt. So lassen sich die Bahnen mit genauen Passern auch mehrfarbig bedrucken.



ELEKTROSTATISCHE VERVIELFÄLTIGUNG

Von den zahlreichen Verfahren der Vervielfältigungstechnik sind heute besonders diejenigen im Vordringen, die auf elektrischen und photoelektrischen Effekten beruhen (Xerographie; zur Theorie s. Elektrophotographie S. 412).

Um 1935 gelang es dem Amerikaner Chester F. Carlson, einen gangbaren Weg für die Erzeugung von Ladungsbildern nach Vorlagen zu finden. Carlson benutzte einen photokonduktiven Halbleiter, einen festen Körper, der in Dunkelheit Isolator, in Licht elektrischer Leiter ist, und brachte ihn schichtweise auf eine leitende Platte. Nachdem er die Halbleiterschicht in Dunkelheit elektrostatisch aufgeladen hatte, projizierte er ein Muster auf sie. An den belichteten Stellen floß die Ladung ab; an den unbelichteten Stellen blieb jedoch eine Restladung erhalten, die er durch Bestäuben mit einem geeigneten Puder (z. B. Collophonium) sichtbar machte. Das so erhaltene Puderbild wurde auf einen Papierbogen übertragen und dort fixiert. Dieses Druckverfahren nannte er Xerographie. Damals wie heute wird ein elektrostatisches Ladungsbild dazu benutzt, eine färbende Substanz auf eine Halbleiterschicht zu bringen, die hier die Funktion einer Druckform übernommen hat. An die Stelle von Carlsons Schwefel- oder Anthrazenplatten sind allerdings heute Selen-, Selen/Arsen- oder Selen/Tellurschichten getreten. Ebenso wurde die Entwicklungsmethode auf einen hohen Stand gebracht, so daß es heute ohne weiteres möglich ist, mit Hilfe der Puderwolkenentwicklung eine Auflösung von 120 Linien/mm oder mit flüssigen Farbstoffen von 1000 Linien/mm zu erreichen.

Heute hat sich eine Methode durchgesetzt, die als sog. Kaskadenentwicklung bekannt geworden ist. Ein Kunststoffpuder (Toner) mit speziellen reibungselektrischen Eigenschaften und großer Feinheit (0,5—3 Mikron) wird mit Stahl- und Quarzkügelchen, die mit einer ausgesuchten Plastikschicht überzogen sind und als Träger dienen, gemischt. Sobald dieses Gemisch in Bewegung gerät, laden sich Trägerkügelchen und Kunststoffpuder gegenseitig auf. Der Puder erhält dabei eine Aufladung, die zweckmäßigerweise entgegengesetzt der Ladung der Halbleiterschicht sein soll. Wird nun ein solches Gemisch auf der beschichteten Platte bewegt, so bleiben die zunächst an den Trägern befindlichen Puderteilchen an den stärkeren Ladungsstellen der Schicht haften. Das anfänglich unsichtbare Ladungsbild wird durch die Puderanlagerung sichtbar. Nach Abschluß der Entwicklung, die nur Sekunden dauert, befindet sich ein vollständiges Puderbild auf der Platte. Um dieses Staubbild nun auf ein beliebiges Stück Papier oder einen anderen Werkstoff zu übertragen, setzt man ebenfalls elektrostatische Kräfte ein. Der vorgesehene Bedruckstoff wird dazu lediglich über das Puderbild gelegt und von der Rückseite her aufgeladen. Das Puderbild haftet sodann an dem Bedruckstoff. Die Fixierung des übertragenen Puderbildes erfolgt durch Einfluß von Hitze, die den thermoplastischen Puder zum Schmelzen bringt, durch chemische Lösungsmittel, die aufgesprüht werden, oder durch eine Lackierung.

Die xerographische Vervielfältigungstechnik wird nicht nur eingesetzt, um auf schnelle und einfache Weise Duplikate von Originalen herzustellen. Durch die Verwendung von normalem unpräpariertem Papier ergeben sich interessante Möglichkeiten, wenn beispielsweise Papiere eingesetzt werden, die durch geeignete Unterdrucke fälschungssicher gemacht wurden. Andererseits sind Transparentpapiere und Offsetfolien verwendbar und eröffnen ihrerseits neue Einsatzgebiete in der Druckformenherstellung. Darüber hinaus ist es z. B. auch möglich, die Ausgabegeschwindigkeit bei Datenverarbeitungsanlagen (s. S. 680 ff.) mit xerographisch arbeitenden Druckern zu steigern. Das Ladungsbild wird z. B. durch die Elektroden der die Zeile bildenden Druckköpfe entsprechend den Impulsen aus der Datenverarbeitungsanlage erzeugt und danach in der beschriebenen Weise sichtbar gemacht.

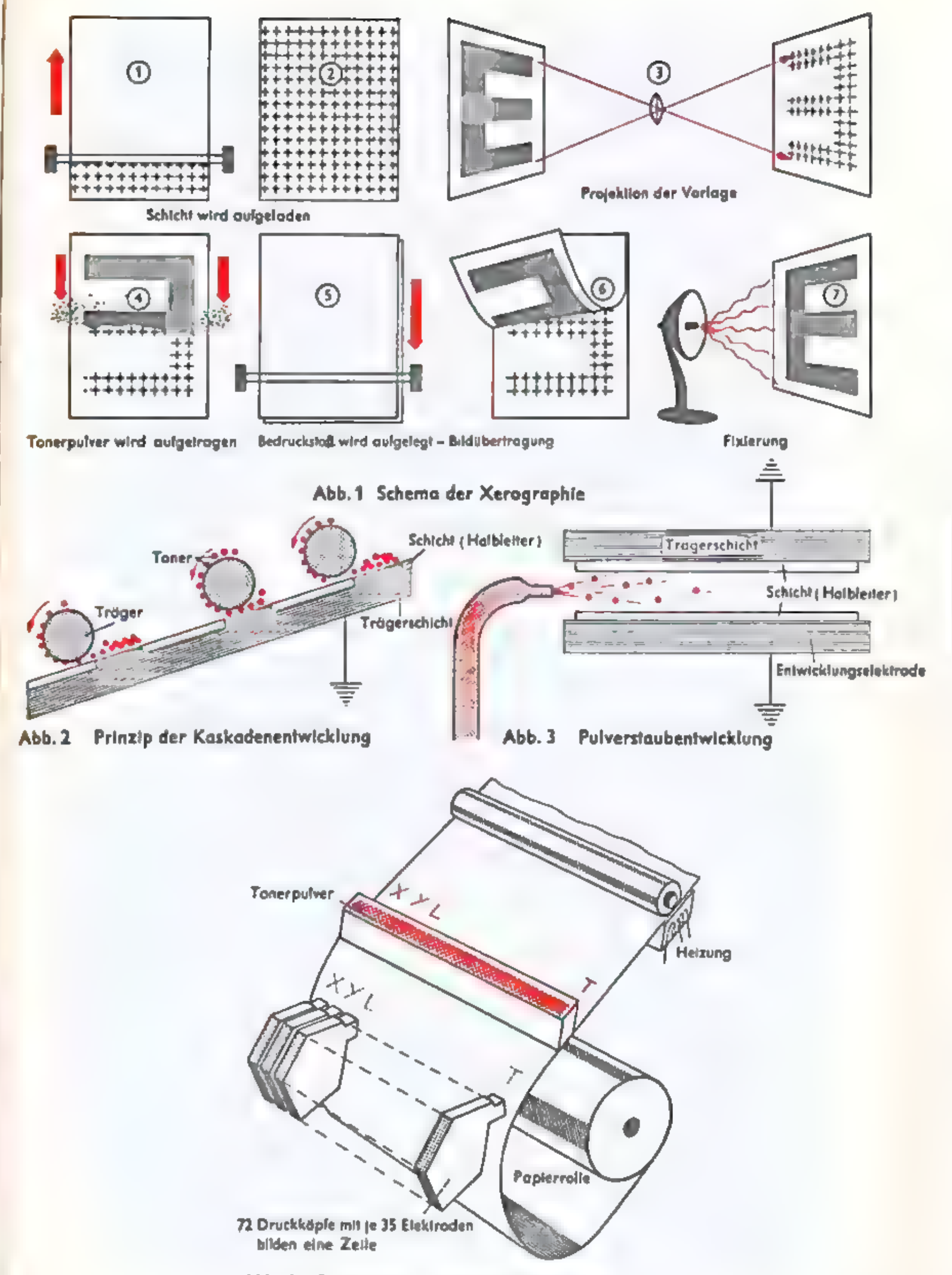


Abb. 1 Schema der Xerographie

Abb. 2 Prinzip der Kaskadenentwicklung

Abb. 3 Pulverstaubentwicklung

Abb. 4 Prinzip eines Schnelldruckers (Borrough)

INDUSTRIELLE BUCHBINDEREI

Bei der Buchfertigung unterscheidet man nach Ausführung der Druckarbeiten drei Phasen: (1) die Buchblockherstellung, (2) die Deckenherstellung und (3) das Vereinigen von Buchblock und Decke. Der buchbinderische Werdegang eines Buches verläuft beispielsweise wie folgt:

Die aus der Druckerei angelieferten bedruckten Bogen (Rohbogen) werden zunächst in Glattstoßmaschinen ihrer Druckanlage entsprechend genau Kante auf Kante gebracht. Nach dem Schneiden in der *Schneidmaschine* werden die Falzbogen in Schwert- oder auf Stauchfalzmaschinen so oft auf ihrer längeren Seite in der Mitte gefaltet, bis sich das Buchrohformat und die richtige Reihenfolge der Seitenzahlen ergibt.

Der erste Bogen eines Buches enthält die Seiten 1 bis 16 und wird als Signatur 1 bezeichnet; der zweite Bogen enthält die Seiten 17 bis 32 (Signatur 2) usw.

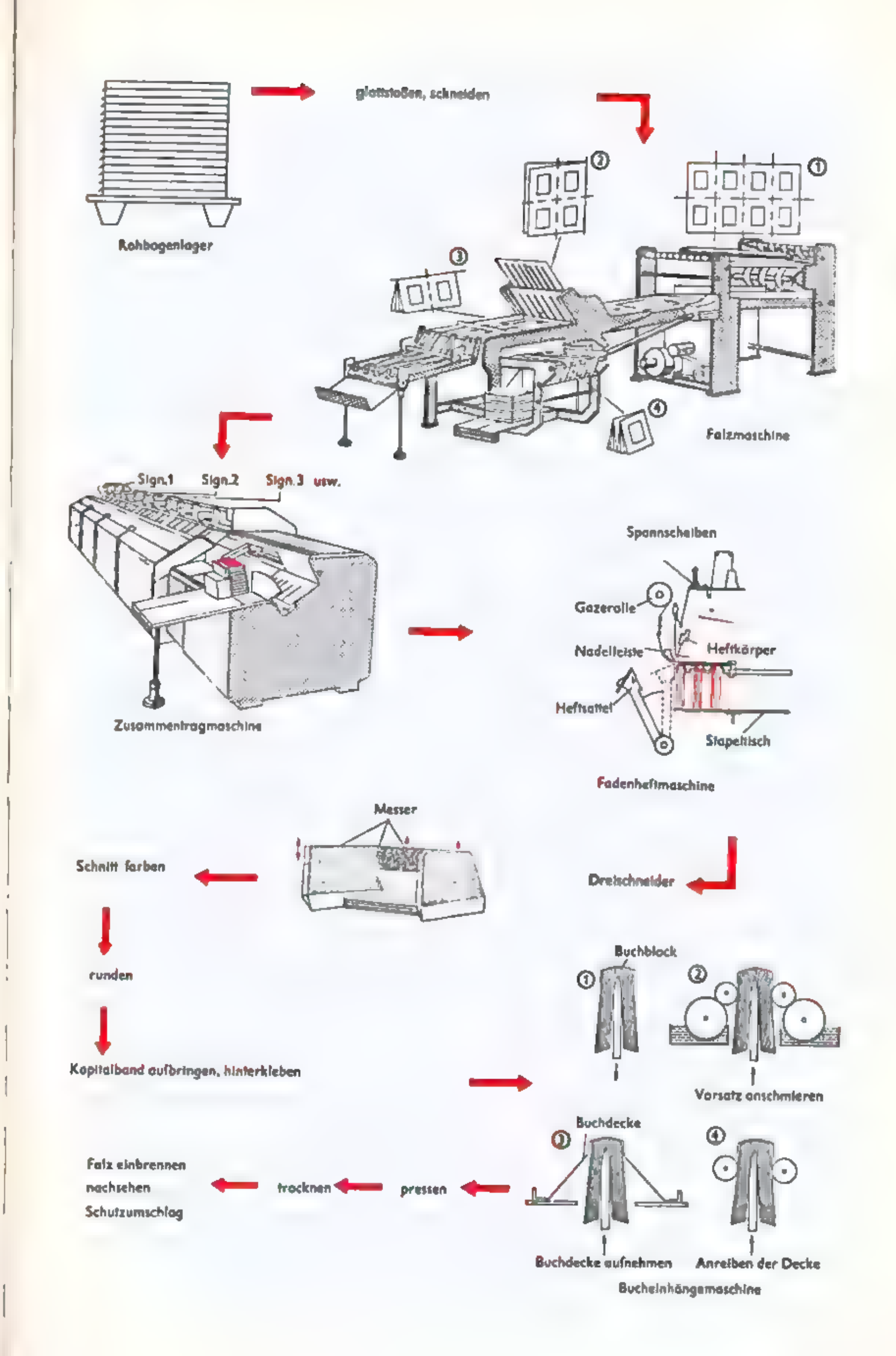
Diese verschiedenen gefalzten Signaturen werden auf die Stationen der *Zusammentragmaschine* aufgelegt. Jede Station befördert eine Falzlage auf ein kontinuierlich durchlaufendes Band, so daß der ersten Falzlage des Buches alle weiteren dazugelegt werden, bis sich der komplette Buchblock aus losen Falzlagen ergibt. Die Kontrolle der Vollständigkeit (Kollationierung) erfolgt durch die auf dem Rücken je Falzlage aufgedruckte Flattermarke.

Das Verbinden der Falzbogen untereinander erfolgt in der Regel durch Fadenheften, Drahtheften, Klebebinden und ähnliche Maßnahmen. Im Falle des Fadenheftens werden die einzelnen Falzbogen durch Heftzwirn verbunden. Sie werden dazu in der Mitte aufgeschlagen und auf den Schwingsattel der Heftmaschine gelegt. Dabei stechen Nadeln durch den Rücken und führen die Fäden hindurch. Sind alle Bogen eines Exemplars nacheinander geheftet, ist bereits ein Buchblock entstanden. Zur engeren Verbindung der Bogen untereinander werden die Buchblöcke am Rücken noch zusätzlich geleimt. Es folgen das Niederhalten (Zusammenpressen des Buchrückens) und das Beschneiden der Blocks im *Dreischneider*.

Jetzt wandert der Buchblock weiter in die Schnittfärbemaschine, die den Farbschnitt am Kopf des Buchblocks anbringt, in die Rundemaschine, in der der Rücken des Buches gerundet wird, und in die Kapital- und Hinterklebemaschine. Dort werden vollautomatisch ein rückenverstärkendes Papier und das kopf- und fußverzierende Kapitalband aufgebracht.

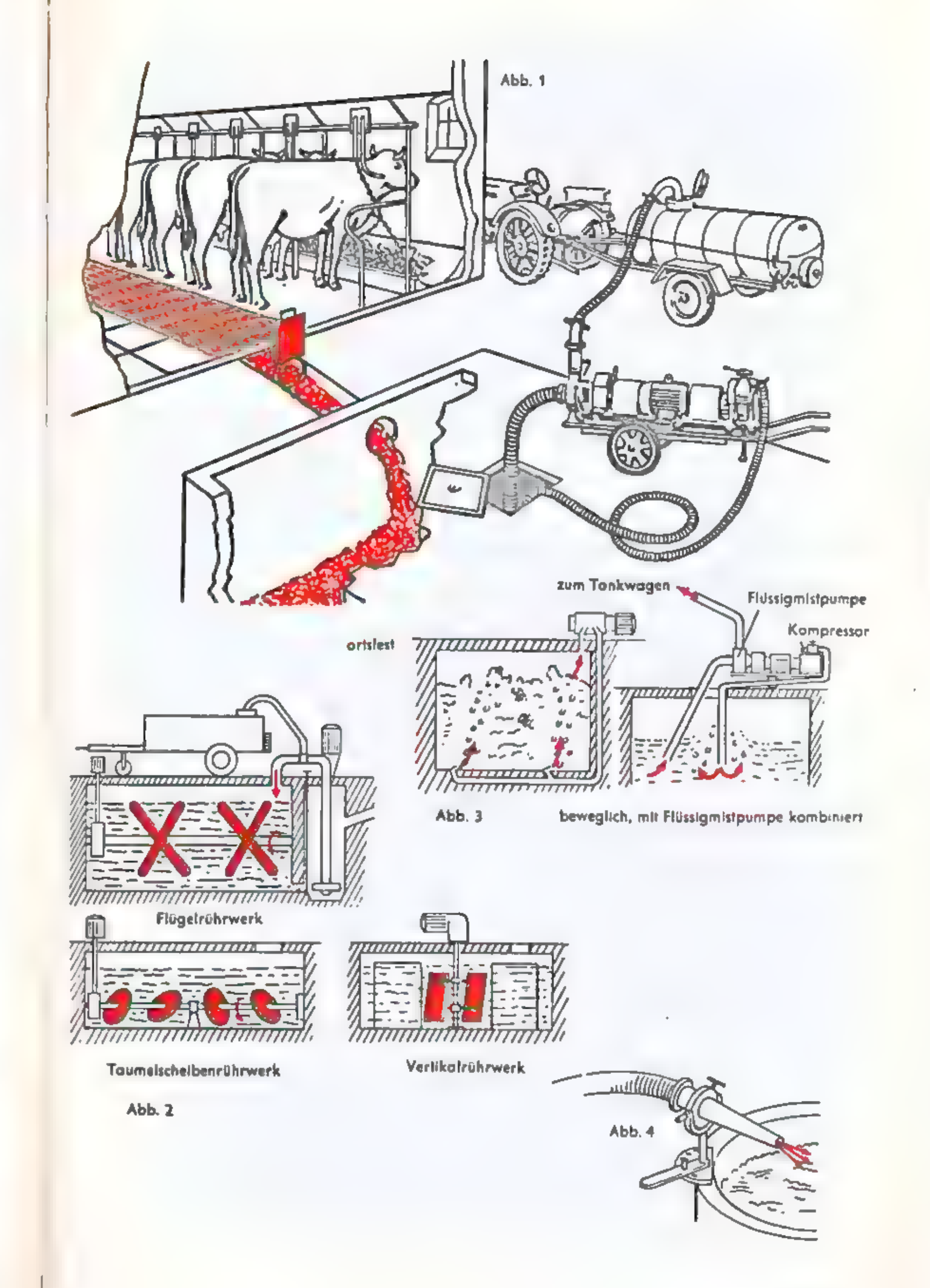
In der *Einhängemaschine* wird der Buchblock in die in gesonderten Arbeitsgängen gefertigte Decke eingehängt. Die Buchdecke wird voll- oder halbautomatisch auf der Deckenmaschine aus zwei im Format dem Buchblock angepaßten Pappen, der Rückeneinlage und dem Bezugstoff (Leinengewebe, Kunststoff) mit Heißleim zusammengehängt. Weitere Deckenbearbeitungsgänge (Ausbiegen, Prägeaufdruck) folgen.

Beim Einhängen wird der Buchblock auf ein sich zwischen Leimwalzen bewegendes Schwert aufgeschoben. Das Schwert führt den Buchblock zwischen den Leimwalzen hindurch (wobei die beiden äußeren Seiten des Blocks mit Leim benetzt werden) und drückt ihn dann in die in einer Halterung darüber befindliche Decke. Das Buch wird kurz vorgepreßt, um dann im großen Stapel in der Stockpresse unter Druck zu trocknen. Jetzt folgen bis zur Versandbereitschaft noch das Falzeinbrennen (Gelenk, Verbindung Rücken-Decke), das Nachsehen, das Umlegen des Schutzumschlags und das Verpacken des Buches.



DER MODERNE STALL I

Bei der Aufstallung von Rindvieh sind verschiedene Stallarten gebräuchlich: Es gibt Anbindeställe, Laufställe und Freiluftlaufställe.
Beim Stallneubau wird berücksichtigt, daß sie für andere Tiere Verwendung finden können, ohne daß teure Umbauten vorzunehmen wären. Der Landwirt kann sich somit bei der Veredelungswirtschaft der Marktlage besser anpassen.
Die Anbindeställe sind in Europa am gebräuchlichsten. Hier werden die Tiere in ein oder mehreren Reihen in Längsrichtung des Stalles nebeneinander angebunden aufgestallt, der zweckmäßigerweise so breit ist, daß man mit einem Wagen durchfahren kann, um das Futter (Grünfutter) in die Tröge abkippen zu können. Die Entmistung wird entweder manuell oder automatisch erledigt.
Die Laufställe sind weniger aufwendige Bauarten. Hier wird das Vieh in einer oder mehreren großen Boxen lose aufgestallt. Der Dung wird erst im Frühjahr oder Herbst mit Frontlader oder Greifer entnommen. Der tägliche Arbeitsaufwand ist gering, da nur eingestreut werden muß. Gemolken wird in einem separaten Melkstand, wo u.a. die Milchkühe entsprechend ihrem Bedarf auch gleichzeitig Kraftfutter erhalten.
Vorwiegend wird jedoch der Laufstall für die Aufstallung von Mastvieh verwendet.
Der Freiluftlaufstall ist die einfachste Art der Aufstallung. Ein nach der witterungsgünstigsten Seite offener Stall ermöglicht dem Vieh ständigen Auslauf.
Der Auslauf reicht bis zum Silo, wo eine automatische Futterentnahme eingebaut ist, die sich zu den Fütterungszeiten einschaltet. Diese Stallart bedingt aber günstige klimatische Verhältnisse und ist deshalb verhältnismäßig wenig in Mitteleuropa anzutreffen.
Beim Anbindestall wird nach der Länge der Standfläche der Tiere in Langstand, Mittellangstand und Kurzstand unterschieden. Durch die Mechanisierung der Entmistung wird bei neuen Stallungen vorwiegend der Kurzstand bevorzugt. Die Standlänge ist hier 10–20 cm kürzer als die Rumpflänge der Tiere. Anschließend an der Standfläche ist die Kotrinne, die etwas tiefer liegt. Diese wird entweder mit Schiebern, die von Seilwinden gezogen oder von kleinen Einachsschleppern geschoben werden, geräumt.
Bei Schubstangenentmistungsanlagen wird der Kot, der mit der Einstreu (Stroh) und Futterresten vermischt ist, schubweise weiterbefördert und bis zu einem Kettenförderer bewegt, der den Stalldung dann bis zum Dunghaufen fördert.
In den letzten Jahren hat jedoch die noch weniger arbeitsaufwendige Schwemmentmistung immer mehr an Bedeutung gewonnen.
Hierbei entfällt das Einstreuen der Tiere ganz. An der Standfläche schließt sich ein Rost an, unterhalb dessen eine Kotrinne mit einem leichten Gefälle zu einem Behälter (Güllegrube) außerhalb des Stalles verläuft (Abb. 1). Der Kot und Harn der Tiere fließt dann vermischt in die Güllegrube (Gülle wird das Gemisch aus Harn und Kot genannt). Die Tiere liegen nicht mehr auf Stroh, sondern auf dem gut isolierten Boden. Er ist entweder aus Kunststoff, Holz oder auch aus Steingut. Die Sauberhaltung der Stallungen ist damit sehr vereinfacht, und die Krankheitserreger sind leichter zu bekämpfen. Die Tiere stehen sauberer, so daß auch die Milchgewinnung hygienischer ist.
Das Füttern mit Silage ist sehr einfach. Entweder wird die Silage mit kleinen auf Schienen laufenden Wagen in den Stall gefahren oder eine Förderschnecke fördert die Silage von der Entnahmefräse des Silos (s. S. 712) direkt bis zum Trog.
Zum Tränken benutzt man Selbsttränken, die für jedes Tier an der Krippe angebracht sind. Berühren die Tiere den Tränkbehälter innen mit der Schnauze, so öffnet sich ein Ventil und das Wasser fließt. Nach kurzer Zeit haben sich die Tiere daran gewöhnt.



DER MODERNE STALL II

Neben der Mechanisierung des Stalles ist auch die Ausbringung des Stalldungs von größter Wichtigkeit, da die Entmistung von Hand sehr schwer ist und nicht gerade zu den angenehmsten Arbeiten der Landarbeit zählt. Hier soll besonders die vollmechanisierte Schwemmentmistung mit den nachfolgenden Mechanisierungsgliedern besprochen werden.

Die selbständig in die Grube geflossene Gülle (Flüssigmist) entmischt sich bei der Lagerung in dem Behälter sehr stark. Schwere Teile setzen sich ab und leichte Bestandteile bilden sogenannte Schwimmdecken. Deshalb müssen Güllegruben gemischt werden. Dabei können unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden: mechanisches Mischen (Abb. 2, S. 708), pneumatisches Mischen (Abb. 3, S. 708) und hydraulisches Mischen (Abb. 4, S. 708).

Zum Ausbringen der Gülle auf den Acker wird sie mit Pumpen in Tankwagen gepumpt. Als Pumpen werden Kolben-, Kreisel-, Propeller- und Schneckenpumpen verwendet. Der Antrieb erfolgt durch Elektromotor oder durch den Schlepper. Abb. 5 zeigt eine Saugdruckpumpe, die zum Mischen und Befüllen des Tankwagens verwendet werden kann.

In Abb. 6 ist eine Propellerpumpe zu sehen, die ebenfalls beide Aufgaben erfüllen kann. Diese Pumpe kann so ausgebildet sein, daß sie wie ein Mixer arbeitet und die festen Bestandteile (Futterreste), die das Fördern beeinträchtigen, zerkleinert.

Eine reine Faßfüllpumpe zeigt Abb. 7.

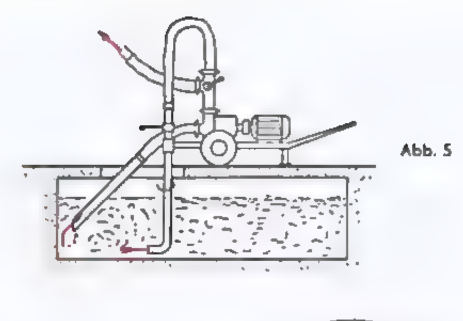
Zur Ausbringung der Gülle werden meistenteils Rohrleitungen verwendet. Sind größere Entfernungen zu überbrücken, benützt man vorwiegend Tankwagen. Das arbeitsaufwendige Verlegen der Rohrleitungen war der Grund, daß sich in den letzten Jahren die Ausbringung der Gülle auf Tankwagen verlagert hat, bei denen es sich um einachsige Fahrzeuge mit einem Fassungsvermögen zwischen 1500 bis 3500 l handelt.

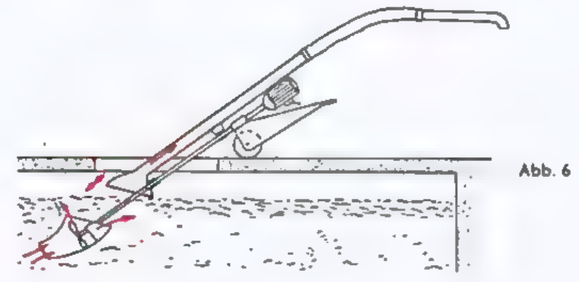
Die Verteilung der Gülle auf dem Feld kann mechanisch (Abb. 10), hydraulisch (Abb. 9) oder pneumatisch (Abb. 8) erfolgen. Einstellbare Verteiler ermöglichen die Ausbringung der gewünschten Menge je Hektar.

Der Antrieb der Verteileraggregate erfolgt bei allen drei Arten über die Zapfwelle des Schleppers. Die Tankwagen können auch mit einer Mischeinrichtung für die Güllegrube und mit einer eigenen Pumpe ausgerüstet sein (Abb. 8 und 9); damit entfallen die einzelnen Geräte zum Mischen und Pumpen. Größere Betriebe bevorzugen jedoch die billigeren Tankwagen ohne Pumpe, da sie dann mit einer Pumpe mehrere gleichzeitig fahrende Tankwagen befüllen können, ohne jeden Wagen mit einer eigenen Pumpe und einem Mischer ausrüsten zu müssen.

Dieses Entmistungsverfahren ermöglicht eine volle Mechanisierung mit geringem Arbeitsaufwand, ist jedoch auch kapitalaufwendig, da der Stall entsprechend gebaut sein muß und ein, den Großvieheinheiten (GV) entsprechender Güllebehälter, erforderlich ist. Je GV wird jährlich mit einem Gülleanfall von 20 m³ gerechnet. Laut KTL (Kuratorium für Technik in der Landwirtschaft; Arbeitsblatt Nr. 55) ist der Zeitbedarf mit einem 30-PS-Schlepper, einem 2000-Liter-Tankwagen bei 1 km Feldentfernung und einem Flüssigmistanfall von 20 m³ je GV auf 3 bis 3,5 Stunden je GV und Jahr anzusetzen. Als Vorteil für dieses Mechanisierungsverfahren kommt noch hinzu, daß der Aufwand für die Strohbergung entfällt, da ja kein Stroh zum Einstreuen benötigt wird. Das Stroh wird gehäckselt und verbleibt auf dem Feld zum Unterpflügen.

Nachteile für die Bodenfruchtbarkeit aufgrund dieses getrennten Düngeverfahrens konnten nicht festgestellt werden.


Abb. 5


Abb. 6

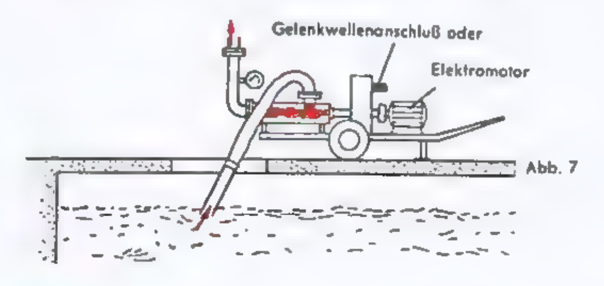


Abb. 7

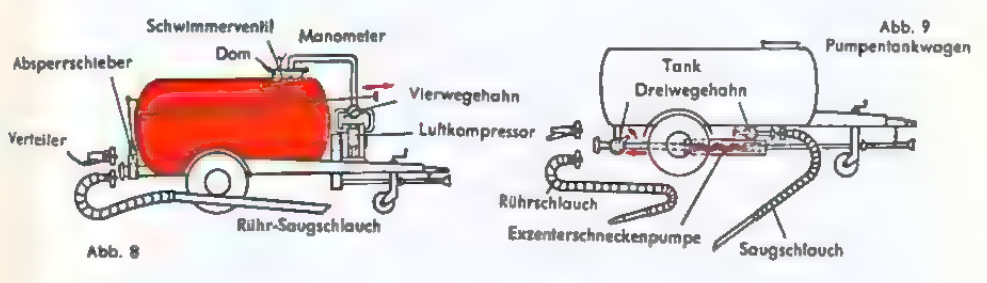


Abb. 8

Abb. 9 Pumpentankwagen

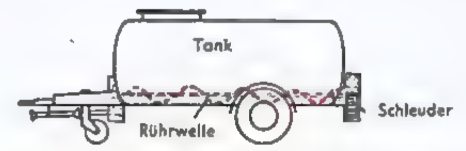


Abb. 10 Schleudertankwagen

GÄRFUTTERSILO

Mit zunehmender Verknappung von Arbeitskräften in der Landwirtschaft bekommt der Gärfuttersilo immer mehr Bedeutung, weil er zur Mechanisierung der Futterwirtschaft, zum Konservieren aller Futtergräser und Futterleguminosen sowie von Mais hervorragend geeignet ist. Aus der Vielzahl der Arten von Silos soll hier der auf der Abbildung dargestellte gasdichte Metallhochsilo beschrieben sein. Für die Futterwirtschaft ist er deswegen besonders geeignet, weil man bei der Konservierung von Futter in der Silowirtschaft weitgehendst vom Wetter unabhängig ist; die Arbeit kann von einer Arbeitskraft verrichtet werden. Abgesehen vom sofortigen Verfüttern ist das Silieren die Konservierungsmethode mit den geringsten Verlusten. Außerdem kann bei gasdichten Hochsilos von oben stets nachgefüllt werden und unten ständig Silage entnommen werden, ohne Beeinträchtigung der Futterqualität durch Fäulnis- und Schimmelbildung. Das Futter wird im Zustand höchsten Nährstoffgehaltes konserviert, so daß Auswaschungs- und Bröckelverluste vermieden werden.

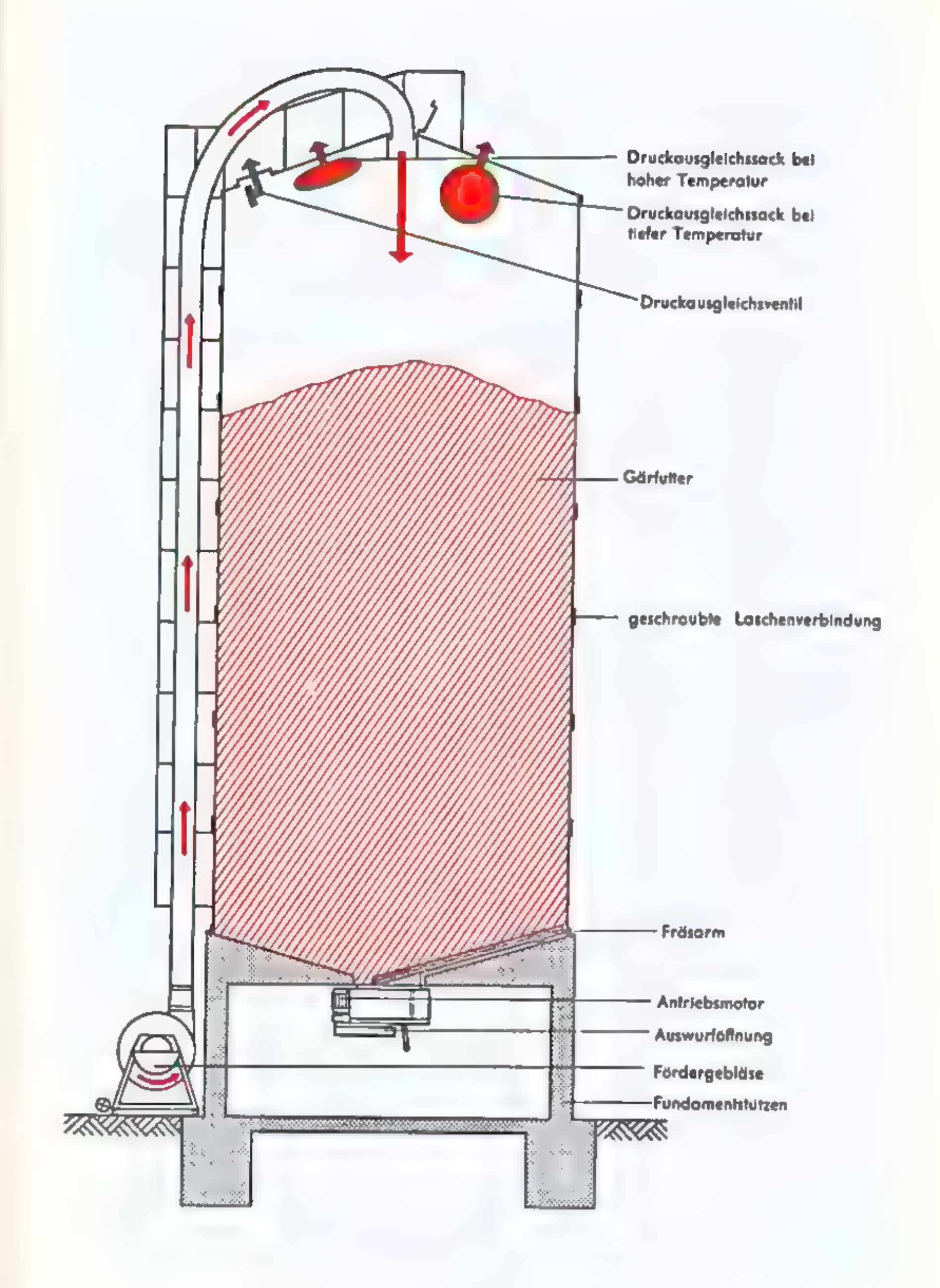
Das Futter wird bei einem Feuchtigkeitsgehalt von 30–40⁰/₀ in den Silo gebracht. Milchsäurebakterien vergären das Futter im gasdichten Silo zu Silage. Die Silage ist ein milchsaures, vergorenes und buttersäurefreies Futter mit hohem Eiweiß- und Karotingehalt, wobei Essigsäure und Hefepilze in verträglichem Maße vorhanden sind. Bei guter Vergärung behält das Futter seine natürliche Farbe und wird vom Vieh gut aufgenommen, ohne daß Heu- oder Kraftfutter zugegeben werden muß.

Der Silo wird durch ein Gebläse mit kurz gehäckseltem Gut von oben befüllt. Nach der Vergärung entnimmt man die Silage bei nicht gasdichten Silos mit einer Obenentnahmefräse, bei gasdichten Silos mit einer Untenentnahmefräse. Ein Förderband bringt die Silage oft bis in den Stall ohne manuelle Arbeit. Die Untenentnahmefräse, die die betriebswirtschaftlich günstigere ist, weil auch während des Befüllens entnommen werden kann (Durchlaufkonservierung), benötigt kurz gehäckseltes Futter, damit die Fräse ohne Störungen arbeiten kann. Die Fräse besteht aus Motor, Getriebe und Fräsarm und ist zentral unter dem Silo eingehängt. Der Fräsarm ragt in den Silo hinein und ist mit einer stabilen, endlosen und mit Messern bestückten Kette versehen, die umläuft und die Silage abfräst, um sie zur Auswurfklappe in der Mitte zu fördern. Die Silage rutscht nach dem Abfräsen im Silo nach. Bei Störungen an der Kette kann die Fräse aufgrund des schrägen Bodens leicht herausgenommen werden. Ein Einfrieren der Silage oder ein Anfrieren an der Behälterwand ist bei Befüllung mit richtigem Feuchtigkeitsgehalt des Futters im mitteleuropäischen Klima nicht möglich, da bei der Gärung Wärme frei wird.

Um Temperaturschwankungen auszugleichen, sind oben im Silo Druckausgleichssäcke angebracht, die bei tiefen Temperaturen Luft aufnehmen ober bei hohen Temperaturen ablassen.

Die Behälterwände sind aus Aluminiumlegierungen oder oberflächengeschütztem Stahlblech. Der Silo ist entweder ganz geschweißt oder verschraubt. Bei verschraubten Silos hat man die Möglichkeit, durch Aufsetzen von weiteren Ringen, den Siloraum nach Bedarf zu vergrößern.

Die Silowirtschaft ist gegenüber anderen Futterkonservierungsmethoden erheblich risikoloser, da man vom Wetter unabhängig ist. Sie läßt sich außerdem lückenlos mechanisieren, so daß der Arbeitskräftebedarf gering ist. Die Investitionen für eine Siloanlage mit allen dazugehörigen Maschinen sind sehr groß, und deshalb ist auch der Silo noch nicht so weit verbreitet, wie es die betriebswirtschaftlichen Vorteile erwarten lassen.



SCHLEPPER- UND SCHLEPPERZUBEHÖR I

Der Schlepper ist die wichtigste Landmaschine im modernen Bauernbetrieb. In seinem Aufbau unterscheidet er sich nur wenig von einem Kraftwagen. Ein Dieselmotor (s. S. 236) gibt meistens über eine Gelenkwelle seine Leistung an das 8–10stufige Schaltgetriebe ab (vgl. S. 504). Über das Differentialgetriebe wird die Leistung dann in die Antriebsräder geleitet. Durch entsprechende Getriebeübersetzung kann an und für sich eine beliebig hohe Kraft an den Hinterrädern erzeugt werden. Die Vortriebskraft und damit auch die Zugkraft des Schleppers hängt jedoch von der Belastung ab, die auf den Antriebsrädern liegt. Bei zu kleiner Achsbelastung der Triebachse würden die Antriebsräder durchrutschen. Deshalb läßt sich eine wesentliche Steigerung der Zugkraft außer durch die entsprechende Getriebeübersetzung nur durch Erhöhung des Druckes der Antriebsräder auf den Boden erreichen. Zu diesem Zwecke werden an die Antriebsachse Zusatzgewichte angeschraubt, oder man füllt die Reifen mit Wasser. Oft werden angehängte Geräte auch so gebaut, daß sie durch die sich bei ihrem Einsatz ergebenden Kräfte eine zusätzliche Hinterachsbelastung ergeben. Neben seiner Aufgabe als Zugmaschine dient der Schlepper immer mehr als Energiequelle für angehängte Maschinen. An den sogenannten Zapfwellen, die aus dem Getriebeblock des Schleppers herausragen, wird die Energie „abgezapft". Der moderne Schlepper besitzt drei Zapfwellen: zwei am Ende des Getriebeblockes unter der Anhängekupplung, von denen eine mit 540, die andere mit 1000 U/min dreht. Mittels einer Gelenkwelle kann von hier aus die Energie an eine angehängte Maschine abgegeben werden. Die dritte Zapfwelle steht nach vorn aus dem Getriebeblock, dreht mit 1000 U/min und dient speziell dem Antrieb eines Anbaumähwerkes (s. S. 716).
Eine weitere sehr wichtige Einsatzmöglichkeit des Schleppers ergibt sich durch die Schlepperhydraulik. Ursprünglich war diese eigens für Hubverstellungen des Dreipunktgestänges (s. S. 716) gedacht. Durch den Anbau weiterer Arbeitskolben für Anbaugeräte (Mähwerkverstellung, Frontlader u. a.) erweitert sich ihr Aufgabengebiet jedoch ständig.
Ölkreislauf der Blockhydraulik: Die Hydraulik-Zahnradpumpe (es gibt auch Kolben- und Flügelzellenpumpen) wird vom Motor über ein kleines Getriebe angetrieben, saugt dabei das Öl aus der Saugleitung, die vom Ölbehälter ausgeht, an und drückt es in die Druckleitung, die zum Steuerventil führt.
In Stellung „Heben" gibt der Längsschieber die Öffnung zum Arbeitszylinder frei. Der Kolben schiebt sich langsam aus dem Zylinder (die von ihm im Block verdrängte Luft kann durch das Luftfilter entweichen). Diese Bewegung wird über Hubschwinge, -welle, -arm und -koppel in eine Hubverstellung der beiden unteren Lenker umgewandelt. Je nach Größe der angehobenen Last bildet sich dabei ein entsprechender Druck in der Druckleitung aus. Ist die Last so groß, daß in der Druckleitung der höchstzulässige Grenzdruck von ca. 150 kp/cm² erreicht wird, so spricht das dem Steuerventil vorgeschaltete Sicherheitsventil an. Es öffnet eine Umgehungsleitung, die direkt zum Ölbehälter führt. Die Last kann nicht gehoben werden, jedoch bleibt die Anlage ohne Schaden. In Stellung „Neutral" schließt der Längsschieber die Leitung zum Arbeitszylinder ab, so daß der Kolben blockiert wird. Da die Pumpe aber ständig weiterläuft und Öl fördert, gibt der Längsschieber gleichzeitig eine Leitung zum Ölfilter frei, wo das Öl unter leichtem Druck durch den Filtereinsatz gedrückt wird und dann in den Ölbehälter zurückfließt. Ist der Filtereinsatz einmal durch Rückstände verstopft, so gibt ein Überdruckventil den Weg zum Ölbehälter frei.
In Stellung „Senken" gibt der Längsschieber die Leitung zum Arbeitskolben frei. Unter dem Druck der angehängten Last fließt das Öl aus dem Arbeitskolben und mit dem von der Pumpe kommenden Öl über das Ölfilter in den Behälter ab. Zur Verriegelung der Hydraulik ist eine Sperre eingebaut, die die Hubschwinge blockiert.

Abb. 1 Schlepper

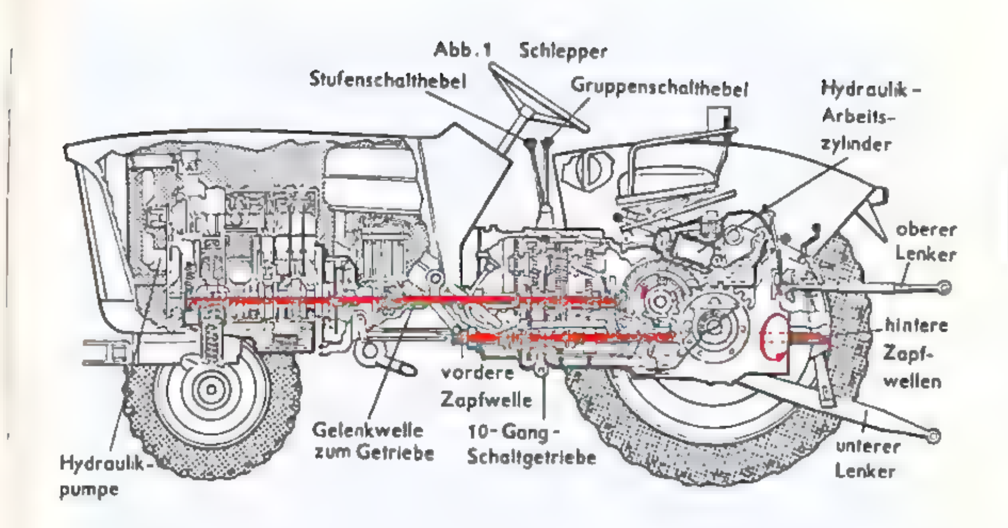
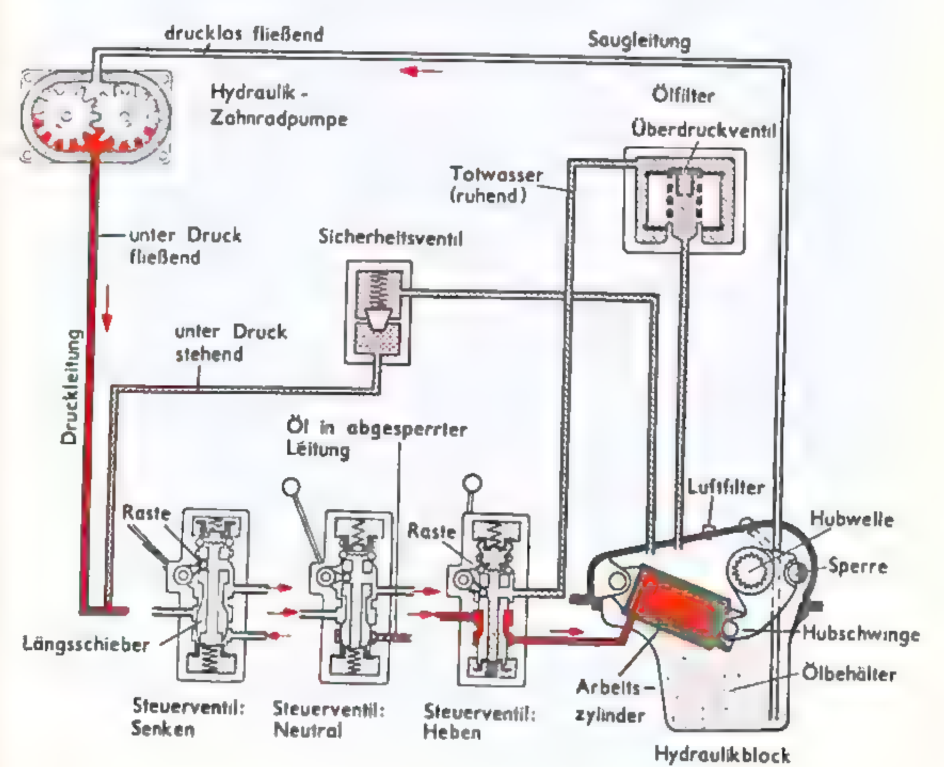


Abb. 2 Ölkreislauf der Blockhydraulik



SCHLEPPER- UND SCHLEPPERZUBEHÖR II

Anbaumähwerk

Die dritte Zapfwelle des Schleppers (s. S. 714) dient speziell dem Antrieb eines Anbaumähwerkes (Abb. 1). Auf dieser Zapfwelle wird hierzu eine Kurbelscheibe angesteckt, die die Messerklinge über Kurbelstange, Schwinghebel und Schwinge in Hubbewegungen versetzt. Gegen Bruchgefahr durch Verstopfungen oder grobe Gegenstände (Steine, Holz) ist der Antrieb mit einer Rutschkupplung abgesichert, die in der Kurbelscheibe eingebaut ist.

Der Pflug

Der Pflug ist eines der ältesten landwirtschaftlichen Geräte. Seine Aufgabe ist es, für eine neue Bestellung des Feldes den Boden zu lockern, Naturdünger, Unkraut und Stoppeln unterzupflügen.

Trotz der fortschreitenden Technik haben sich seine Form und sein Aufbau kaum geändert. Lediglich der Sterzen hat bei den modernen Schlepper-Anhängepflügen seine Daseinsberechtigung verloren.

Das am Grindel befestigte Sech führt einen senkrechten Schnitt in den Ackerboden und trennt so die Land- (ungepflügte Feldseite) von der Furchenseite (gepflügte Feldseite). Das nachfolgende Schar bestimmt die Furchentiefe. Es schneidet den Boden waagerecht und hebt ihn zu dem am Rumpf befestigten Streichblech an, das die Wendearbeit besorgt. Während der fortschreitenden Bewegung des Pfluges durch den Boden übernehmen die Schleifsohle die untere und die Anlage die seitliche Führung des Pfluges. Zum völligen Wenden oder Unterpflügen von Stroh und Stoppeln ist häufig ein Vorschäler angebracht (Abb. 3).

Der Anhängepflug wird an dem Dreipunktgestänge (zwei untere, ein oberer Lenker) des Schleppers mittels Bolzen befestigt.

Abb. 4a: Der Volldrehpflug besitzt zwei übereinander liegende Pflugkörper, von denen der eine nach links und der andere nach rechts wendet. Der Pflug wird dadurch wesentlich schwerer und nicht zuletzt auch teurer. Man gewinnt jedoch den Vorteil, daß Leerfahrten in jedem Falle vermieden werden. Am Ende der Furche wird der Pflug vom Fahrersitz aus durch Betätigung des Drehwerkstellhebels gedreht, und der Schlepper kann nun in der gleichen Furche zurückfahren, wobei der Pflug die Erde, bezogen auf den Acker, in die gleiche Richtung kehrt.

Abb. 4b: Der Beetpflug ist ein einfacher, relativ leichter Pflug. Er wendet den Boden stets nur nach einer Seite. Will man den Acker in seiner Gesamtbreite durch Zusammen- oder Auseinanderpflügen nicht verändern, so bleibt nur die Möglichkeit einer Leerfahrt.

Abb. 4c: Ein moderner, noch wenig verbreiteter Pflug ist der sog. Kreiselpflug. Ein schmales Schar führt den Boden einem von der Zapfwelle des Schleppers angetriebenen Kreiselkörper zu, der die eigentliche Wendearbeit übernimmt. So wird ein verhältnismäßig großer Zugkraftanteil eingespart. Die überschüssige Motorleistung des Schleppers, die wegen der geringen Haftfähigkeit der Reifen nicht in Zugleistung umgewandelt werden kann, wird über eine Gelenkwelle dem Kreiselkörper zugeführt. Man kann so bei guter Krümelung schneller und tiefer als mit den üblichen Pflugarten pflügen.

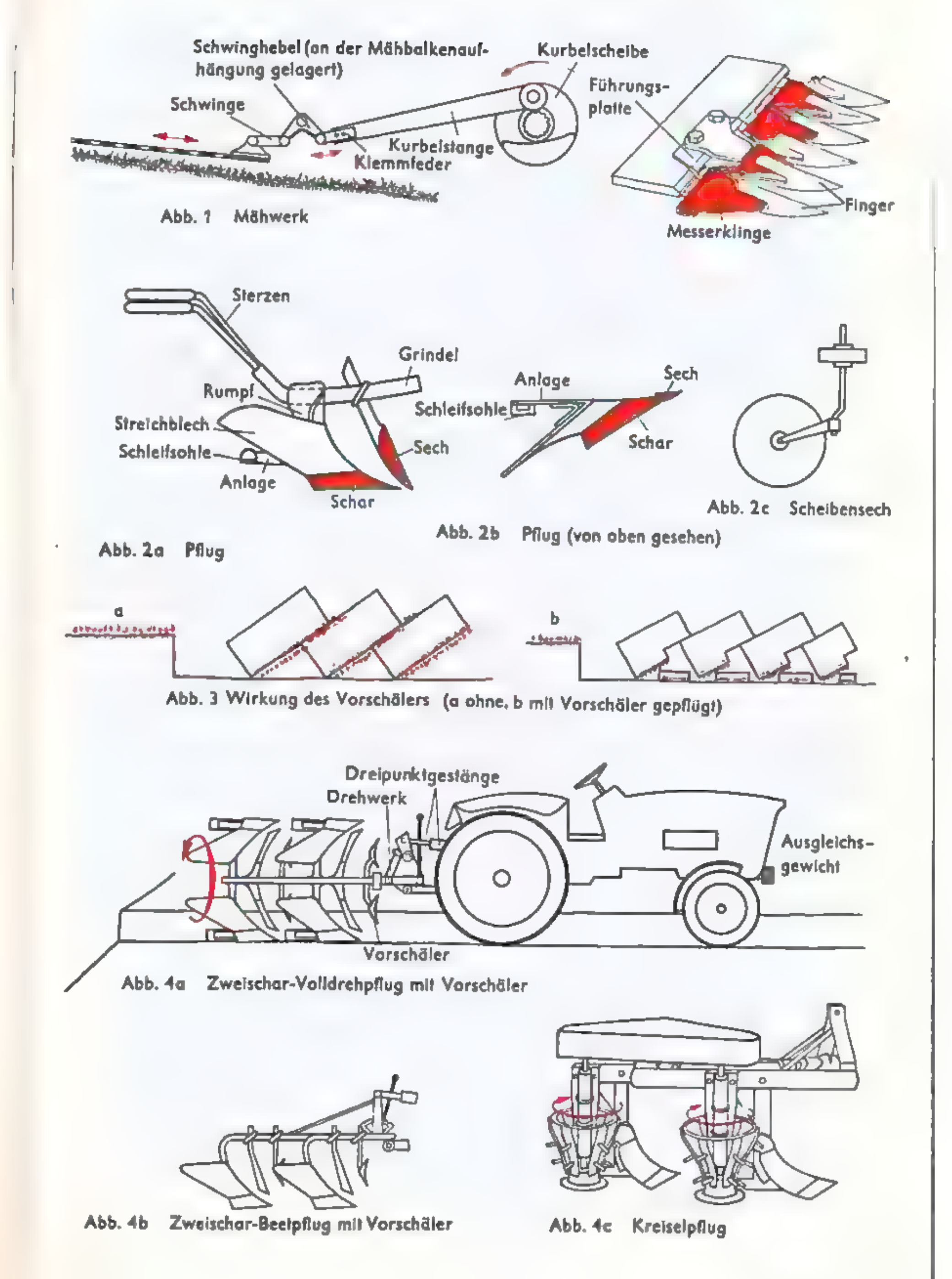


Abb. 1 Mähwerk

Abb. 2a Pflug

Abb. 2b Pflug (von oben gesehen)

Abb. 2c Scheibensech

Abb. 3 Wirkung des Vorschälers (a ohne, b mit Vorschäler gepflügt)

Abb. 4a Zweischar-Volldrehpflug mit Vorschäler

Abb. 4b Zweischar-Beetpflug mit Vorschäler

Abb. 4c Kreiselpflug

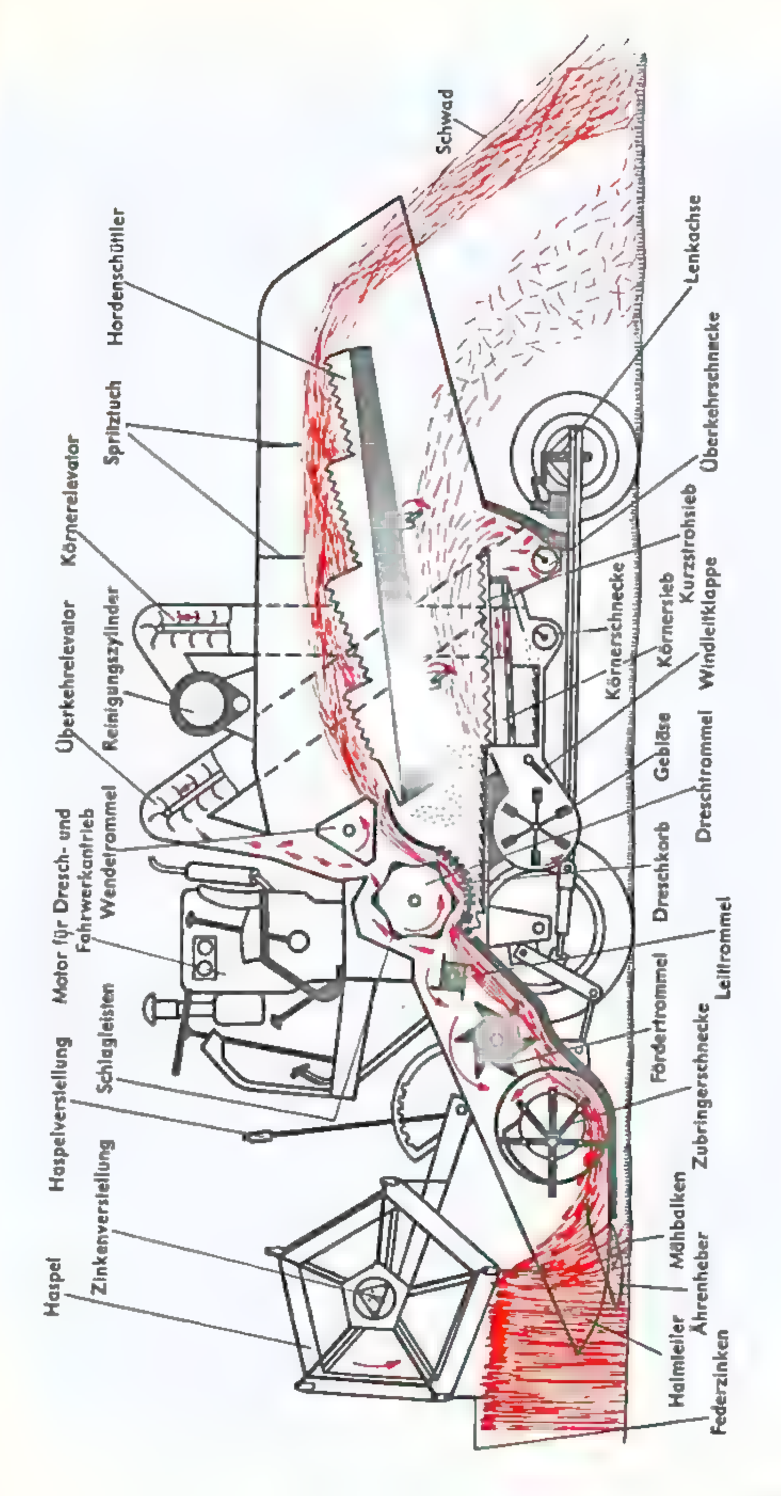
MÄHDRESCHER

Der Mähdrescher ist eine Kombination von Körnerfrucht-Erntemaschine und Dreschmaschine. In einem Arbeitsgang werden die Halme geschnitten, die Körner aus den Ähren gelöst, gereinigt und gegebenenfalls das Stroh gebunden. Nach der Art des Antriebes unterscheidet man Anhängemähdrescher und selbstfahrende Mähdrescher (Selbstfahrer).

Das stehende Halmgut wird vom Mähbalken erfaßt und von einem oszillierenden Messer abgeschnitten, während gleichzeitig die sich drehende Haspel ein Umfallen des Halmgutes in Fahrtrichtung verhindert und die Halme in die Zubringerschnecke drückt. Bei Lagergetreide (von Wind und Regen auf größeren Flächen umgedrücktes Halmgut) heben die Federzinken der tiefgestellten Haspel und mehrere am Mähbalken befestigte Ährenheber das Halmgut an, damit die Halme nicht zu kurz abgeschnitten oder gar vom Mähbalken überfahren werden. Die Zubringerschnecke fördert das Halmgut zur Mitte der Maschine, von wo es Zinken zur Fördertrommel weiterreichen. Danach wird es von der Leittrommel ergriffen und der Dreschtrommel zugeführt, wo sich der eigentliche Dreschvorgang vollzieht.

Mit einer Umfangsgeschwindigkeit von 25–35 m/s klopfen die Schlagleisten auf die Ähren; ihre schrägen Riefen verursachen dabei gleichzeitig in dem engen, verstellbaren Spalt zum Dreschkorb eine reibende Bewegung, wodurch die Körner aus den Ähren gelöst werden und mit Spreu, kurzen Strohteilen und abgeschlagenen Ähren durch den gitterartigen Dreschkorb auf das Kurzstrohsieb fallen. Das ausgedroschene Stroh fließt nun zum Hordenschüttler. Die der Dreschtrommel nachgeschaltete Wendetrommel lenkt dabei das aus dem Dreschkorb kommende Stroh in die Schüttlerebene um und verhindert damit, daß sich längere Strohhalme um die Dreschtrommel wickeln. Körner, die die Dresch- oder Wendetrommel in Flußrichtung schleudert, werden von Spritztüchern abgefangen und fallen auf den Hordenschüttler, der meist aus drei einzelnen Horden besteht, die auf Kurbelwellen um 120° versetzt gelagert sind und sich im Takte bewegen. Sie schütteln das Stroh, bevor es zum Schwad ausgeworfen wird, kräftig durch, damit auch die restlichen Körner (bis auf geringe Verluste) noch herausfallen. Sie rutschen auf dem Boden des Schüttlers zurück und fallen ebenfalls auf das Kurzstrohsieb.

Kurzstroh- und Körnersieb machen kleine Hubbewegungen und verteilen so Körner, Spreu und Kurzstroh gleichmäßig über die ganze Breite des Kanals; dabei wandern die zu reinigenden Teile langsam nach hinten und werden von dem Luftstrom des Gebläses erfaßt. Die leichten Teile, z.B. Spreu und Kurzstroh, fliegen in weitem Bogen ins Freie, während schwerere unausgedroschene Ähren früher herabfallen und in die Überkehrschnecke gelangen. Diese befördert sie zu dem an der Seite liegenden Überkehrelevator, dessen Becher oder Schaufeln sie erneut dem Dreschvorgang zuleiten. Die Körner haben den geringsten Luftwiderstand und fallen durch das Kurzstrohsieb auf das Körnersieb. Hier erfolgt die erste, grobe Reinigung. Während Teile von größerem Durchmesser (oft halbe unausgedroschene Ähren) in die Überkehrschnecke abgesiebt werden, fallen die Körner in die Körnerschnecke. Die richtige Einstellung des Gebläses bestimmt hauptsächlich die Reinheit des Erntegutes und zugleich auch die Höhe der Körnerverluste. Um eine Anpassung an die verschiedensten Getreidearten zu ermöglichen, sind Stärke und Richtung des Windes einstellbar. Die Regelung der Stärke erfolgt meist durch Drosseln der Ansaugluft, während die Richtung durch die Windleitklappe korrigiert werden kann. Die Körnerschnecke drückt die ausgedroschene Frucht in den Körnerelevator, mit dessen Hilfe sie in den Reinigungszylinder gelangt, wo die meisten der restlichen Verunreinigungen entfernt werden, bevor das Gut endgültig über die Absackvorrichtung in Säcke gefüllt wird.



RÜBENVOLLERNTEMASCHINE

Durch die Rübenvollerntemaschine (Abb. 1) werden z. B. Zuckerrüben in einem Arbeitsgang geköpft, geputzt, gerodet, gesammelt und umgeladen. Das Köpfen übernimmt die Köpfvorrichtung (Abb. 3 und 4). Das Tastrad, das sich mit einer Umfangsgeschwindigkeit dreht, die etwas höher als die Fahrgeschwindigkeit der Maschine ist, wird von dem Stützrad knapp über dem Boden geführt. Die Rübe, der sich die Maschine nähert, wird von dem Tastrad überlaufen, wodurch das Köpfmesser auf die richtige Schnitthöhe angehoben wird. Durch die höhere Umfangsgeschwindigkeit des Tastrades wird ein Ausweichen der Rübe unter dem Druck des Messers nach vorn verhindert. Während die geköpfte Rübe von dem seitlich an der Kuppe noch stehenden kleinen Blattwerk durch die gegenläufig rotierenden Gummischläger der nachfolgenden Putzschleuder befreit wird (vgl. Abb. 5), wandert der abgeschnittene Rübenkopf mit den Blättern, von dem Tastrad über die Messerharfe geschoben, über den Blattelevator, an dessen Ende er in dem Blattsammelbehälter (nicht eingezeichnet) oder über eine Rutsche zum Längsschwad abgelegt wird (Abb. 2). Parallel zur Köpfvorrichtung arbeitet der Rodemechanismus in der zuvor geköpften Reihe. Die Rodegabel wird von den Führungskufen stets in der zu Beginn eingestellten Arbeitstiefe geführt. Sie erfaßt die geköpfte Rübe unterhalb ihres größten Umfanges, löst sie aus dem Boden und führt sie dem seitlich liegenden Siebstern zu. Um ein Ausbrechen der Rübe vor der Rodegabel zu verhindern, läßt sich zwischen Stützrad und Führungskufen noch ein Scheibensech anbringen. Der rotierende Siebstern schleudert die Rübe mehrmals gegen das Leitgitter, wodurch noch anhaftende Erde von ihr gelöst wird. Der Leitrost führt die Rübe dem Rübenelevator zu, der sie zum Rübenbunker bringt. Je nach der Länge des Ackers und dem Ertrag können mehrere Reihen gerodet werden, bevor man den Bunker in einen bereitgestellten Wagen entleeren muß. Hierzu braucht man nur seitlich an den Wagen heranzufahren und das Entladeband, das eine Wand des Rübenbunkers bildet, einzuschalten. Damit auch alle Rüben den Zinken des Bandes zugeführt werden, läßt sich der Rübenbunker um die Achse A–A (Abb. 1) durch einen Hydraulikkolben anheben, ohne daß sich die Stellung des Bandes ändert. Damit auch aus der Reihe stehende Rüben von der Rodegabel richtig erfaßt werden können, sind die Rodewerkzeuge in einem kleineren Bereich lenkbar konstruiert. Die Lenkung erfolgt über Steuerrad und Spindel vom Steuersitz der Maschine aus oder im „Einmannbetrieb" hydraulisch durch den Schlepperfahrer, der die Steuergeräte hierzu seitlich auf dem Kotflügel befestigt hat. Die Antriebsenergie erhält die Rübenvollerntemaschine über eine Gelenkwelle von der Zapfwelle des Schleppers (s. S. 714).

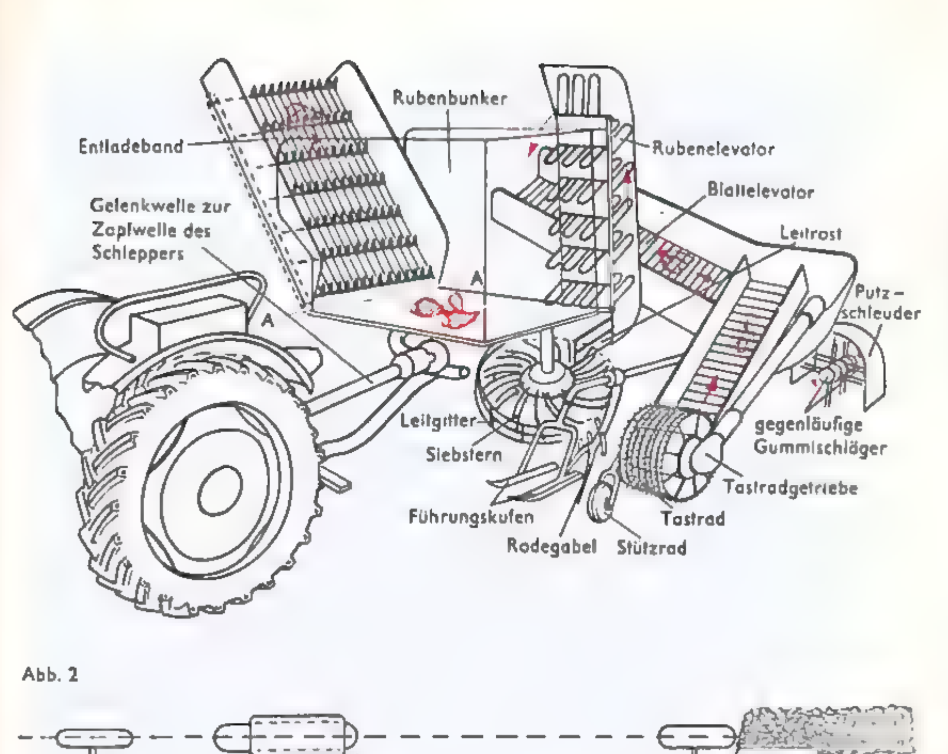
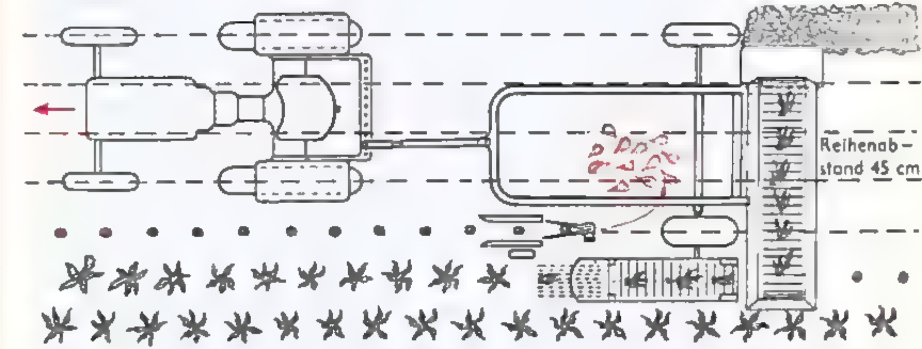


Abb. 2



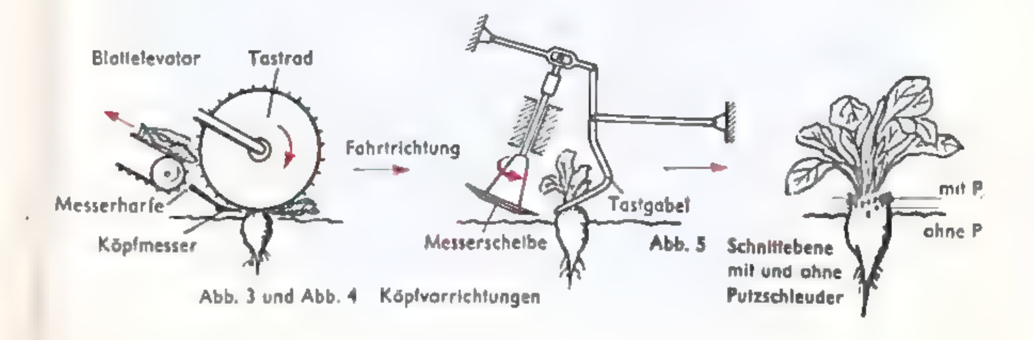


Abb. 3 und Abb. 4 Köpfvorrichtungen

Abb. 5 Schnittebene mit und ohne Putzschleuder

HOCHDRUCKSAMMELPRESSE

Die Hochdrucksammelpresse sorgt für eine rationelle Heu- und Strohbergung. In einem Arbeitsgang wird das Gut aufgenommen, gepreßt, gebunden und aufgeladen. Das im Schwad gelagerte Heu oder Stroh wird von den Pick-up-Zinken erfaßt, angehoben und unter den Niederhaltezinken hindurch zur Förderschnecke geleitet. Diese schiebt das Gut zum Zubringerzinken, der es im Rhythmus der Kolbenbewegung in den Preßkanal bringt. Hier wird es vom Preßkolben zu handlichen Lagen zusammengedrückt. Um ein Klemmen des nur teilweise zugeführten Gutes zu vermeiden, werden überstehende Halme von Preßkolben- und Gegenmesser abgeschnitten. Mehrere Lagen werden vom Bindegetriebe zu Ballen mit variabler Länge zweifach gebunden (s. u.). Dabei läßt sich der Pressungsgrad verändern, wenn man den Kanal durch Verstellung der Preßschiene erweitert oder verengt (Abb. 1).

Die ausgestoßenen Ballen werden schließlich in der sogenannten Ballenschurre nach oben auf den Wagen gedrückt, wo sie abgenommen und aufgesetzt werden. Es besteht auch die Möglichkeit, anstelle der Schurre eine Ballenschleuder zu verwenden.

Ihre Antriebsenergie bezieht die Presse über die Gelenkwelle von der Zapfwelle des Schleppers (s. S. 714). Das Schwungrad gleicht die Belastungsspitzen des Kolbens aus und überwindet so den Totpunkt bei der Pressung. Hierdurch wird ein verhältnismäßig ruhiger Lauf der Maschine erreicht. Geraten mit dem Erntegut sperrige Fremdkörper (Steine, Holz, Eisen) in die Maschine, so wird ein größerer Schaden durch Abscheren des Sicherheitsstiftes, der das Schwungrad auf der Kurbelwelle mitnimmt, vermieden. Das Schwungrad dreht sich nun frei und kann seine aufgespeicherte Energie nicht mehr auf den Kolben übertragen. Nach Beseitigung des Fremdkörpers wird der Stift erneuert und die Maschine ist wieder betriebsfertig. Weitere Überlastungssicherungen sind in Form von Rutschkupplungen eingebaut. Diese Kupplungen sprechen bei Überschreitung der eingestellten Höchstbelastung an und rutschen durch, bevor die Bruchgrenze der Antriebsteile erreicht wird.

Der Knüpfvorgang (Abb. 3): Die Knüpfwerkzeuge sind in den Abbildungen 2a, 2b und 2c dargestellt; Abb. 3a zeigt den Ausgangszustand. Nachdem das Garn in die (in Abb. 3a nicht sichtbare) Nadel eingefädelt ist, wird das freie Ende durch den Messerhebel gezogen, über die Knoterzunge gelegt und zwischen Garnhalter und Garnscheibe festgeklemmt. Während des Preßvorganges wird das Garn aus dem Garnkasten gezogen und legt sich um den nach hinten wandernden Ballen. Hat dieser die eingestellte Länge erreicht, so wird der Bindemechanismus ausgelöst (Abb. 3b). Während der Preßkolben zum nächsten Stoß ausholt, bringt die Nadel durch den Preßkanal das Garn hoch, umfaßt so den Ballen und legt den 2. Faden über die Knoterzunge zu dem freien Ende in die Garnscheibe, welche sich, noch bevor die Nadel wieder zurückgeht, zu drehen beginnt und so beide Garnfäden sicher festhält (Abb. 3c). Gleichzeitig beginnt die Drehung des Knoters. Im letzten Drittel der Umdrehung (Abb. 3d) öffnet sich die Knoterzunge, so daß die beiden Garnenden zwischen Zunge und Schnabel zu liegen kommen. Die Garnscheibe dreht sich ebenfalls weiter und hält im nächsten Augenblick den zur Nadel führenden Faden in der zweiten Nute fest (Abb. 3e). Bis zu diesem Zeitpunkt ist die Knoterdrehung vollendet. Der Schnabel hat sich geschlossen und das Messer schneidet durch eine Schwenkbewegung des Messerhebels die Fäden zwischen Knoter und Garnscheibe ab. Durch Fortführung der Schwenkbewegung wird nun die Garnschlinge mittels Abstreifer von dem Knoter gestreift (Abb. 3f), wobei die beiden kurzen freien Enden durch die Schlinge gezogen werden. Der Knoten ist geknüpft und der Messerhebel geht in seine Ausgangsstellung zurück. Die Nadel hat sich inzwischen so weit gesenkt, daß sie den Preßkanal für den nächsten Kolbenhub freigibt.

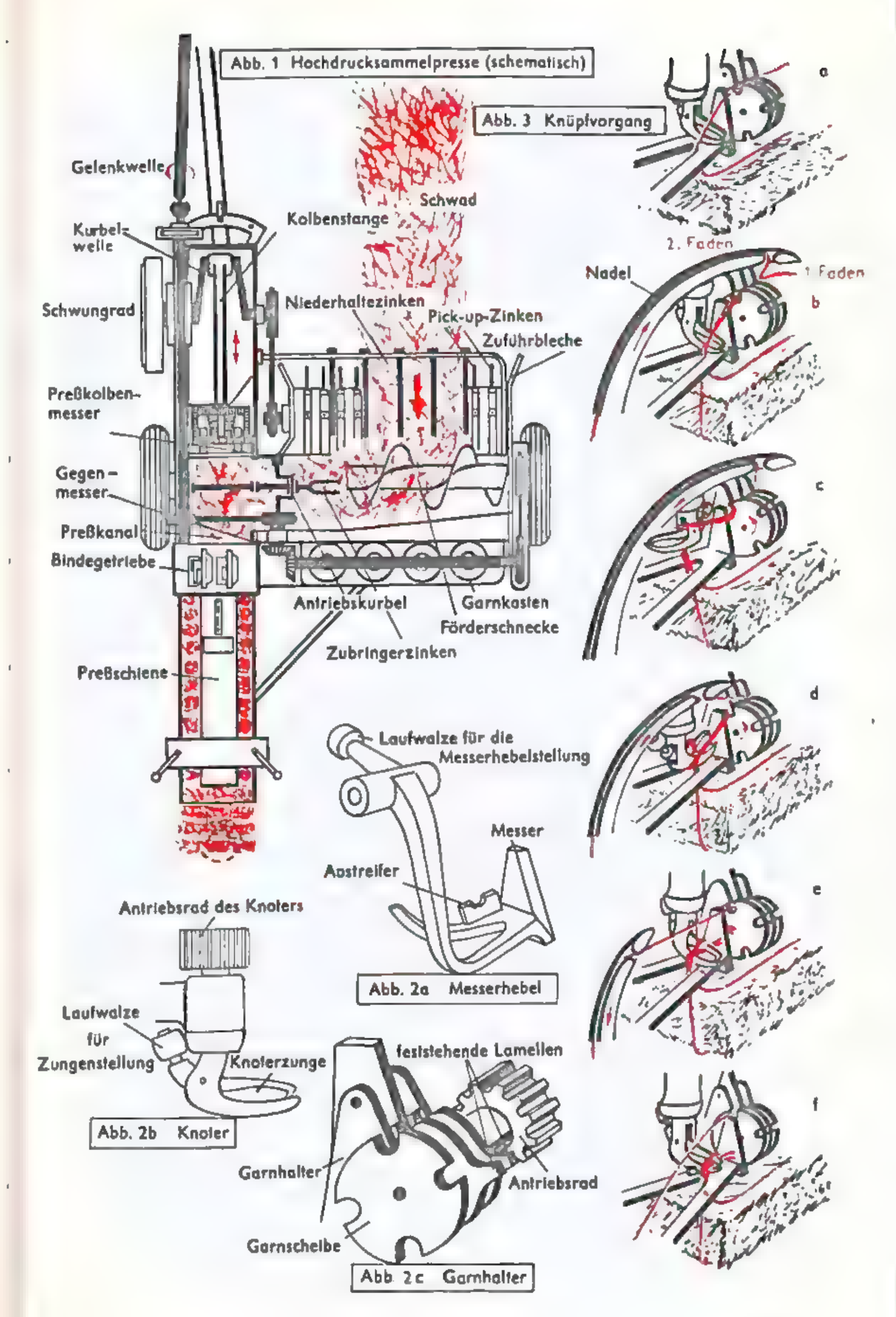


Abb. 1 Hochdrucksammelpresse (schematisch)

Abb. 3 Knüpfvorgang

Abb. 2a Messerhebel

Abb. 2b Knoter

Abb 2c Garnhalter

KREISELZETTWENDER

Zu den erfolgreichsten Heumaschinen der letzten Jahrzehnte gehört der Kreiselzettwender oder auch kurz Kreiselheuer genannt. Der Kreiselzettwender wird zum Zetten und Wenden des gemähten Gutes benötigt (Gras, Klee, Luzerne, Gemenge u. ä.). Das stehende, noch grüne Gut wird mit einem Schleppermähwerk (Zwischenachs- oder Heckmähwerk) oder mit einem Schwadenmäher (mit eigenem Antriebsmotor) gemäht und in ein oder mehreren Schwaden abgelegt. Das Mähwerk, welches z. B. 1,50 m breit schneidet, legt mittels eines Seilbrettes (Schwadbrett genannt) ein 1,20 m breites Schwad ab, damit der Schlepper beim nächsten Schnitt nicht mit den Reifen auf das abgemähte Gut fährt. Nach dem Mähen, oder oft auch gleichzeitig, wird dieses Schwad auseinandergebreitet, damit die Angriffsfläche für die Sonne und den Wind so groß wie möglich ist. Dieses Ausbreiten des Mähschwades nennt man Zetten.
Ist das gezettete oder auch breitgestreute Gut oben abgetrocknet, so wird es gewendet. Das Wenden geschieht genauso wie das Zetten, nur fährt jetzt der Schlepper nicht mehr in der vom Schwadbrett des Mähwerks freigeräumten Spur, sondern über das breitgestreute Futter. Neigt das Wetter zu starkem Nachttau oder starkem Frühnebel und ist der Trocknungsprozeß an einem Tage noch nicht abgeschlossen, so werden mit dem Kreiselzettwender kleine Nachschwade (auch Lohreihen) gemacht, damit der Tau oder Nebel eine möglichst geringe Angriffsfläche hat. Mit einem zusätzlichen Getriebe wird die Drehzahl der Kreisel so reduziert, daß nur noch das Gut zusammengerecht wird. Der Kreiselzettwender, den es in verschiedenen Arbeitsbreiten und Ausführungen gibt, zettet das Schwad, indem zwei zueinander sich drehende Kreuze mit am Ende befestigten Doppelzinken das Gut vorne zusammenrechen und nach hinten breit auseinanderwerfen. Jedes Kreiselkreuz hat ein Tastrad, welches allen Bodenunebenheiten folgt und somit auch unebenes Gelände kopiert. Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Systeme zur Bodenabtastung. Eine Ausführung, wie in Abb. 1 gezeigt, erreicht es damit, daß der Rahmen gelenkig ist und sich somit jedes Kreiselkreuz dem Boden anpassen kann. Das zweite System hat einen starren Rahmen und jedes zweite Rad kann teleskopartig nach oben oder unten ausweichen, wodurch ebenfalls eine gute Bodenanpassung erreicht wird. Die Kreiselkreuze können mit einer Spindel stärker oder schwächer an den Boden gestellt werden, je nachdem, ob es sich um Wiesengras oder Ackerfutter handelt. Vom Schlepper wird der Kreiselzettwender gezogen oder auch bei Dreipunktmaschinen (an drei Punkte gehängt) getragen. Durch eine Gelenkwelle wird der Kreiselheuer mit 540 U/min vom Schlepper angetrieben. Über ein Getriebe und entsprechend der Kreiselanzahl vorhandenen Winkeltrieben werden die Kreisel mit einer Geschwindigkeit von 10–14 U/s angetrieben. Zwei Kreisel drehen sich immer paarweise zueinander. Der Kreiselzettwender hat aufgrund seiner besonderen Konstruktion (keine oszillierenden, sondern nur gleichmäßig rotierende Teile) eine sehr hohe Flächenleistung. Bei einer Arbeitsbreite der Maschine von 4,80 m (6 Kreisel) und einer Fahrgeschwindigkeit von 15 km/h beträgt die Flächenleistung 7,2 ha/h. Somit hat der landwirtschaftliche Betrieb die Möglichkeit, die wenigen Stunden während der Heuernte voll zu nutzen. Als Ergänzungsmaschine für die Heuwerbung wird zum Kreiselzettwender noch der Sternradrechen benötigt, da der Kreiszettelwender nur Zetten und Wenden kann und der Sternradrechen das Schwaden und Rechen übernimmt.

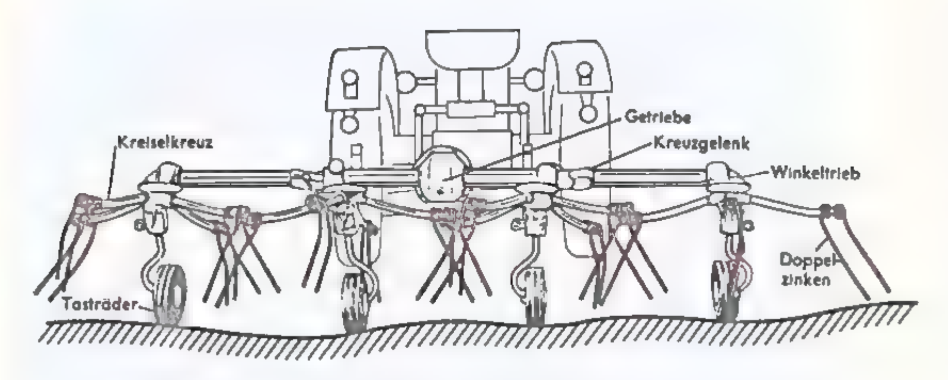


Abb. 1 Kreiselzettwender

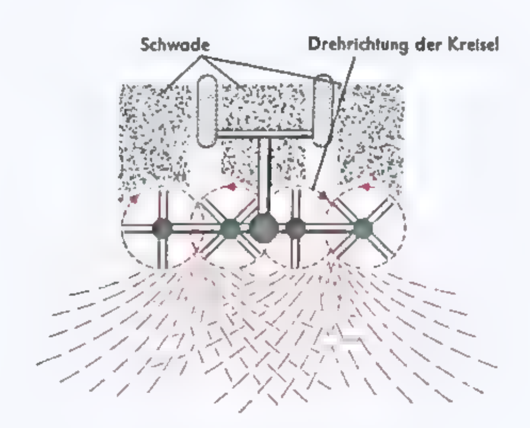


Abb. 2 Kreiselzettwender beim Zetten (Draufsicht)

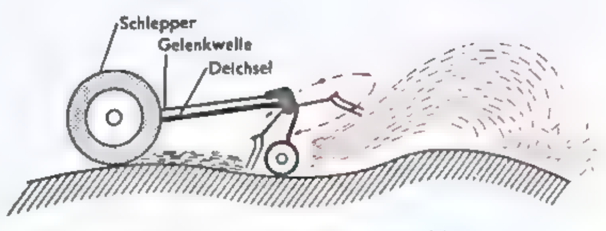


Abb. 3 Kreiselzettwender beim Wenden (Seitenansicht)

REGISTER